ЗРП
С602

А. П. СОЛОВОВ

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов университетов, обучающихся по специальности «Геохимия»

742-121-85
У
БИБЛИОТЕКА
УЧЕБНЫХ
ПОСОБИЙ № 1
МГУ

МОСКВА „НЕДРА" 1985

УДК 550.84(075.8)

Соловов А. П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1985, 294 с. ил.

Последовательно рассмотрены теоретические основы геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых — литохимического, гидрохимического, атмохимического и биогеохимического. Изложены основные принципы ведения поисковых литохимических съемок разного масштаба, приведена методика количественной интерпретации полученных данных для оценки прогнозных ресурсов минерального сырья. Особое внимание уделено вопросам поисков рудных месторождений.

Для студентов геологических вузов и факультетов по специальности «Геохимия».

Табл. 32, ил. 118, список лит. — 50 назв.

Рецензенты:

кафедра геохимических и радиоактивных методов поисков (Ленинградский горный институт),
М. И. Толстой, доктор геол.-минер. наук (Киевский государственный университет)

С $\frac{1904020000-433}{043(01)-85}$ 42—85

© Издательство «Недра», 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ

Преподавание курса «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых» было начато в СССР в 1938 г. на геофизических факультетах Ленинградского горного (доц. Е. А. Сергеевым) и Московского геологоразведочного институтов (проф. А. И. Заборовским) под названием «Физико-химические методы поисков». Позднее этот курс под своим современным названием вошел в учебные программы большинства геологических вузов и рекомендован Методическим Советом по высшему геологическому образованию для всех геологических специальностей. На геологическом факультете МГУ с 1959 г. его читал чл.-кор. АН СССР А. А. Сауков, автор первого учебного пособия по этому курсу, которое вышло в свет в 1963 г. Возрастающая роль и большие объемы поисковых геохимических работ нашли свое отражение в том, что в 1962 г. в Ленинградском горном институте была организована первая кафедра по геохимическим методам поисков.

Основу подготовки студентов-геохимиков составляют дисциплины общенаучного и геологического профилей, а также специальные курсы — общая геохимия, геохимия отдельных элементов, учение о полезных ископаемых, методы лабораторных геохимических исследований, математической обработки данных и т. п. При большом числе монографий и специализированных сборников по геохимическим поискам, публикуемых у нас и за рубежом, учебная литература по этому вопросу остается сравнительно бедной. Данный учебник отвечает программе курса, читаемого автором с 1964 г. на отделении геохимии геологического факультета МГУ. Дополняют этот лекционный курс практические занятия по сборнику задач [42], исполнение студентами курсовых работ, прохождение ими производственной и преддипломной практики по геохимическим методам поисков и написание на этой основе дипломных работ.

При подготовке книги существенную помощь автору оказали А. Д. Ананченко, С. А. Воробьев, А. А. Матвеев, С. А. Миляев, Ю. В. Шваров, Т. В. Чепкасова, ряд лиц представили свои данные. Всем им автор выражает свою благодарность.

Глава 1

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Основной и нередко единственной целью всех геологических работ, независимо от их конкретного содержания, является обеспечение промышленности запасами минерального сырья. Решается эта задача сочетанием геологических, геофизических и геохимических исследований с горными работами и бурением. На всех стадиях геологоразведочного процесса важная роль принадлежит геохимическим методам поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Появление современных геохимических методов поисков было подсказано требованиями экономики и подготовлено трудами классиков геохимии, в первую очередь исследованиями В. И. Вернадского (1863—1945), развитием учения о месторождениях полезных ископаемых и прогрессом в области аналитической техники. Создание геохимических методов поисков рудных месторождений связано с именем Н. И. Сафронова (рис. 1) и относится к 1931—1932 гг., когда под его руководством в геофизическом секторе ЦНИГРИ (ныне ВСЕГЕИ) в Ленинграде началась разработка физико-химического метода поисков и были успешно проведены первые полевые работы с использованием этого метода в различных рудных районах Советского Союза [34]. Одновременно В. А. Соколовым (1900—1971) в Москве разрабатывались геохимические методы поисков месторождений нефти и газа. Выявившаяся за короткий срок высокая геологическая эффективность новых методов привела к их широкому применению в СССР, а затем и в зарубежных странах. В настоящее время геохимические поиски рудных месторождений проводятся во всем мире. Советскому Союзу принадлежит первое место по объему применения и уровню развития теоретических основ этих методов. Приоритет советских ученых в области создания геохимических методов поисков неизменно признается зарубежными авторами.

С помощью геохимических методов в Советском Союзе за последние десятилетия было открыто более 100 промышленных месторождений олова, меди, свинца и других металлов. Многочисленные открытия рудных месторождений за рубежом, в частности в развивающихся странах, обязаны применению геохимических методов поисков.

Современное учение о геохимических поисках месторождений полезных ископаемых представляет собой стройную систему знаний, отвечающую всем признакам самостоятельного раздела геологических наук: наличию собственного предмета исследований, соответствующей методики исследований и специальной терминологии. Предметом исследований при геохимических поисках являются геохимическое поле и его локальные аномалии, в частном случае приобретающие смысл промышленных месторождений. Методом исследований являются геохимические съемки с последующей геологической, геохимической и физико-математической интерпретацией полученных данных. Вопросы специальной терминологии, в числе прочих, рассматривает в нашей стране Межведомственный Совет по научным основам геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых, созданный в 1968 г. совместным решением АН СССР и Министерства геологии СССР. Совет координирует исследовательскую работу в этой области, созывает общесоюзные тематические сессии, организует региональные семинары и публикует их труды. С возрастающей активностью протекает международный обмен в области методики геохимических поисков.

Рис. 1. Н. И. Сафронов (1904—1982)

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОХИМИИ

Современная горная промышленность извлекает разнообразные химические элементы из их природных скоплений, предъявляя к соответствующим месторождениям полезных ископаемых вполне определенные требования в части содержаний ценных компонентов, масштаба запасов и геолого-экономических условий их залегания. Это определяет общую направленность геологосъемочных, поисковых и разведочных работ к обнаружению локальных концентраций химических элементов с целью выбора объектов для промышленной разработки. Прямой метод выявления таких концентраций — геохимические поиски.

В основе геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых лежат четыре важнейших положения геохимии, имеющие первостепенное прикладное значение и подтвержденные бесспорными опытными данными [36]:

а) повсеместное распространение химических элементов во всех геосферах;

б) непрерывная миграция (перемещение) элементов во времени и в пространстве;

в) многообразие видов и форм существования элементов в природе;

г) преобладание рассеянного состояния элементов над концентрированным, особенно для рудообразующих элементов.

Повсеместную распространенность химических элементов подтверждают результаты анализа химического состава любых горных пород, минералов, природных вод, органических образований или искусственных материалов, устанавливающие наличие в них определимых содержаний самых различных элементов, чуждых их основному составу. Даже в оптически прозрачном монокристалле кварца соответствующие методы анализа обнаруживают содержания Fe, S, Pb, Cu, As, Au, Ag, Na, K, Mg и многих других элементов, не предусмотренных канонической формулой минерала — SiO_2, присутствие которых не может быть объяснено с позиций изовалентного или гетеровалентного изоморфизма элементов. Отражением всеобщей распространенности элементов служат цифры их кларков — средние содержания химических элементов в доступных для исследования геосферах. Участие отдельных элементов в составе этих геосфер существенно различно (табл. 1). Кларки большинства химических элементов, в частности важных для промышленности цветных и редких металлов, оцениваются только тысячными или миллионными долями процента.

Однако цифры кларков являются расчетно-статистическими величинами и не содержат в своем определении условия обязательного присутствия всех химических элементов в любом природном образовании, имея в виду минимальные объемы вещества, с которыми оперирует геологическая практика (1 г, 1 мл, 100 мг и т. п.). Формулировка закона о всеобщем распространении химических элементов принадлежит В. И. Вернадскому, который в своей знаменитой речи на XII съезде рус-

Таблица 1

Основной химический состав геосфер

Геосферы	Главнейшие элементы	Число химических элементов	Сумма кларков, %
Литосфера	O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti	9	99,48
Гидросфера	O, H, Cl, Na, Mg	5	99,58
Атмосфера	N, O, Ar	3	99,94
Биосфера	O, C, H, Ca, K, N, Si, Mg, P, S	10	99,96

Примечание. Под биосферой понимается область развития живых организмов, охватывающая нижние горизонты атмосферы, часть литосферы и гидросферы. Кларки биосферы характеризуют средний химический состав живого вещества.

ских естествоиспытателей и врачей 28 декабря 1909 г. говорил: «В каждой капле и пылинке вещества на земной поверхности, по мере увеличения тонкости наших исследований, мы открываем все новые и новые элементы. Получается впечатление микрокосмического характера их рассеяния. В песчинке или капле, как в микрокосмосе, отражается общий состав космоса» [9, с. 401]. Впоследствии В. И. Вернадский постоянно возвращался к этому вопросу, указывая, что даже при ничтожных содержаниях элементов, находящихся в состоянии рассеяния, число их атомов уже в небольшом объеме вещества достигает огромных цифр. Так, например, в 1 $см^3$ морской воды находится $n \cdot 10^7$ атомов радия при его содержании $n \cdot 10^{-13}$ %. Как следствие этого, современная геохимия отрицает результаты химического анализа, характеризующие отсутствие какого-либо элемента в пробах, заменяя понятие «нет» понятием «не обнаружено». Последнее имеет существенно иной смысл, указывая на содержание элемента ниже порога чувствительности анализа. Одновременно это подчеркивает хорошо известные трудности получения «сверхчистых веществ» и практическую невозможность достижения их «абсолютной» чистоты. По предложению Н. И. Сафронова этот основной закон геохимии — о всеобщем рассеянии химических элементов — именуют «законом Вернадского».

Миграция химических элементов находит отражение в гигантских тектоно-магматических процессах, преобразующих земную кору, и в тончайших химических реакциях, протекающих в живом веществе, в непрерывном поступательном развитии окружающего мира, характеризуя движение как форму существования материи. Миграция химических элементов определяется многочисленными внешними факторами, в частности, энергией солнечного излучения, внутренней энергией Земли, действием силы тяжести и внутренними факторами, зависящими от свойств самих элементов. Различия в миграционной способности (подвижности) химических элементов приводят к их дифференциации и к возникновению природных образований с различными количественными соотношениями между элементами. Результатом этого являются, при качественном единообразии, различия и непостоянство содержаний химических элементов в любых точках земного пространства. Процессы концентрации и рассеяния химических элементов характеризуют две взаимосвязанные и взаимопротивоположные стороны единого процесса миграции элементов.

Большой цикл геологической миграции химических элементов иллюстрирует схема, показанная на рис. 2. Отражая внедрение подкоровых магматических расплавов, этот цикл не является замкнутым и характеризует поступательное развитие литосферы. Важно отметить, что эндогенные месторождения формируются в процессе магматической и постмагматической деятельности, разнообразные экзогенные месторождения —

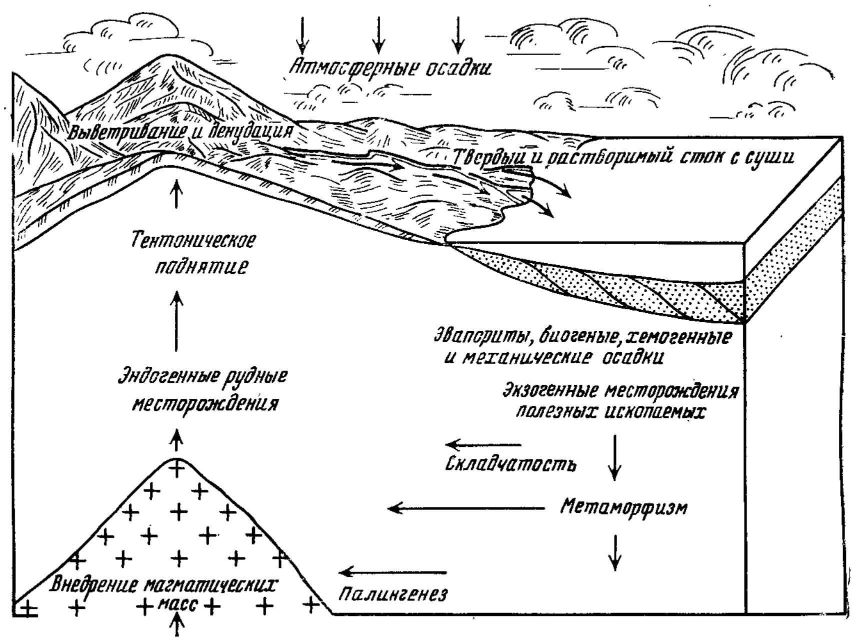


Рис. 2. Схема геологического цикла миграции химических элементов

в процессе седиментогенеза. Область суши во все геологические времена была ареной развития процессов выветривания и денудации, основной результат которых — разрушение и ликвидация ранее сформированных месторождений полезных ископаемых.

Разнообразие видов и форм существования химических элементов находит отражение в множестве тех природных химических соединений, механических смесей и растворов, которые они образуют в различных агрегатных состояниях, и многообразии физико-химических связей между элементами. Наряду с минеральной формой существования элементов, насчитывающей около трех тысяч видов, широко проявлены безминеральные формы, которые для гидросферы, биосферы и атмосферы служат основной формой существования большинства химических элементов. Характерное для литосферы нахождение элементов в форме диагносцируемых минералов дополняется их присутствием в форме нераспознаваемых собственных субмикроскопических минералов, в виде разнообразных изоморфных и неизоморфных твердых растворов, водных внутрипородных молекулярно-пленочных растворов или внутрикристаллических газово-жидких включений, а также в состоянии сорбции и окклюзии. Нахождение элементов в безминеральной форме в виде неопределенных, переменных по составу примесей к минералам, не предусмотренных их формулами и стехиометрическими соотношениями, — прямое следствие повсеместного распространения химических элементов.

Тезис о преобладании рассеянного состояния над концентрированными состояниями элементов требует некоторых пояснений. В процессе миграции химических элементов, с учетом многообразия видов и форм их существования, возможно возникновение природных образований с практически любым (весьма низким или очень высоким) содержанием конкретного элемента. Противоречащими закону Вернадского являются содержания элемента, равные 0 и 100 %. При этом нельзя установить какую-либо объективную границу между низкими содержаниями элемента, отвечающими его рассеянному состоянию, и высокими содержаниями, соответствующими концентрированному состоянию. В ряду непрерывных содержаний элемента любая подобная граница была бы произвольной, поскольку двум сколь угодно близким содержаниям элемента, лежащим по разные стороны от граничного, приписывались бы различные качественные состояния. Поэтому уместно ограничиться определением двух крайних состояний, понимая под рассеянным состоянием элемента содержания, близкие к его кларкам, а под концентрированным — близкие к его содержаниям в полезных ископаемых, из которых этот элемент извлекается в промышленных целях. Примеры, характеризующие содержания некоторых элементов в состояниях рассеяния и концентрации, приведены в табл. 2. В последнем столбце этой таблицы даны примерные цифры отношений между содержаниями элемента в полезном ископаемом $C_р$, из которого он извлекается, и его кларком $C_к$ для соответствующей геосферы. Эти цифры принято называть «кларками концентрации», обозначая их $K_к$.

Для оценки количественных соотношений между рассеянным и концентрированным состоянием элементов Н. И. Сафронов подсчитал общие запасы 11 главнейших металлов в земной коре в пределах суши до глубины 1 км, определяемые их кларками, и запасы тех же металлов, сосредоточенные в их место-

Таблица 2

Соотношения между рассеянным и концентрированным состояниями элементов

Химический элемент	Рассеянное состояние		Концентрированное состояние		Кларк концентрации $K_к = C_р/C_к$
	Геосфера	$C_к$, %	Объект	$C_р$, %	
Fe	Литосфера	4,65	Рудное тело	45,0	10
Cu	»	$4,7 \cdot 10^{-3}$	То же	1,0	200
Pb	»	$1,6 \cdot 10^{-3}$	»	1,5	1 000
Hg	»	$8,3 \cdot 10^{-6}$	»	0,2	24 000
Br	Гидросфера	$6,5 \cdot 10^{-3}$	Минеральные воды	0,4	60
He	Атмосфера	$5,2 \cdot 10^{-4}$	Газовая залежь	1,0	2 000
H	Литосфера	0,1	Нефтяная залежь	12,0	120

рождениях (состоящих на учете, ранее выработанных и предполагаемых). В итоге даже при 40—250-кратном увеличении цифр учтенных промышленных запасов доля их от общих «геохимических запасов» составила совершенно ничтожные величины [36] (в %):

медь	$-4{,}3\cdot10^{-2}$;	кобальт	$-4{,}4\cdot10^{-4}$;
свинец	$1{,}5\cdot10^{-1}$;	олово	$-3\cdot10^{-3}$;
никель	$-1{,}8\cdot10^{-3}$;	ртуть	$-1{,}3\cdot10^{-1}$.

По независимым подсчетам Мак-Келвея, доля запасов ценных металлов, сосредоточенная в месторождениях США, составляет от $n(10^{-4}\div10^{-3})$ % до 0,04 % (максимум) от их общих «кларковых» запасов в литосфере для той же территории до глубины 1 км.

Обобщая изложенное выше, приходим к выводам, что содержания любых химических элементов в доступных для изучения геосферах в среднем характеризуются цифрами соответствующих кларков, они всегда больше нуля, зависят от координат и непостоянны во времени. Образование локальных концентраций химических элементов требует затраты внешней энергии и наличия совокупности благоприятных условий. В геологическом цикле миграции химических элементов (см. рис. 2) подобные условия возникают неоднократно и результатом их является образование месторождений полезных ископаемых различных генетических типов. Одновременное возникновение комплекса благоприятных условий, необходимых для концентрации элементов, принадлежит к числу редких геологических событий и только малая доля глобальных запасов химических элементов сосредоточена в соответствующих месторождениях. Поэтому обнаружение новых месторождений, удовлетворяющих промышленным требованиям, составляет относительно трудную геологическую задачу.

1.3. ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЕГО ЛОКАЛЬНЫЕ АНОМАЛИИ

Геохимическим полем именуется геологическое пространство, охарактеризованное цифрами содержаний химического элемента C_x как функциями координат и времени, или

$$C_x=f(x,\ y,\ z,\ T)>0. \qquad (1)$$

В зависимости от характера процессов, определяющих то или иное распределение содержаний химического элемента и формы его нахождения, выражение (1) приобретает различный геологический и математический смысл.

Для изучения геохимического поля производятся измерения содержаний химических элементов путем геохимического опробования в отдельных точках наблюдений или непрерывно. Термину «опробование» придается широкий смысл — оно выполняется с отбором проб с последующим их анализом или без пробоотбора, путем контактных или дистанционных определений химического состава природных образований. Измерения содержаний химических элементов без пробоотбора с применением специальной аппаратуры часто называют «геофизическим опробованием», что не меняет его смысла как средства исследования именно геохимического поля.

По результатам измерений геохимического поля составляются карты и разрезы в изоконцентрациях или строятся графики по линиям опробования. По уровню содержаний химических элементов геохимические поля могут быть сравнительно однородны, могут изменяться плавно или осложняться локальными аномалиями. Путем анализа структуры геохимического поля и его количественной интерпретации, с учетом геологических и геофизических данных, делаются поисковые и разведочные выводы.

В абсолютном большинстве точек геохимического поля значения C_x близки к цифрам соответствующих кларков и только в редких случаях достигают значений, существенно отличающихся от этого уровня. Рассеянное состояние элементов — это их естественное, нормальное состояние, а концентрированное состояние — отклонение от нормы или аномальное состояние. Залежи полезных ископаемых являются частными случаями природных геохимических аномалий, общее число которых существенно превышает число промышленных месторождений. Задача поисков рудных месторождений геохимическими методами решается поиском геохимических аномалий. Взаимосвязанные понятия о нормальном геохимическом поле и аномальных содержаниях химических элементов требуют более подробного рассмотрения.

Результаты геохимического опробования горных пород, речных или подземных вод, растений или почвенного воздуха, проведенного вдоль направления x вкрест простирания линейной структуры на постоянной глубине $z=\mathrm{const}$, в простейшем случае не будут зависеть от y и z. С учетом кратковременности наших наблюдений по сравнению с длительностью геологического времени их можно считать независимыми и от времени T. В этих условиях выражение (1) приобретает характер одномерной зависимости:

$$C_x=f(x) \qquad (2)$$

и отвечает графику содержаний данного химического элемента по профилю опробования. Допуская значительную протяженность этого профиля и соединяя ломаной линией содержания элемента, соответствующие точкам опробования, легко обнаружить большие отрезки графика с относительно постоянными и низкими или фоновыми содержаниями элемента $C_ф$ и редкие отклонения от этого уровня, носящие характер геохимических аномалий (рис. 3). При геохимических исследованиях часто среди многих сотен, а иногда и тысяч проб с фоновыми содержаниями рудных элементов обнаруживаются только единичные

Рис. 3. График геохимического опробования по профилю

пробы с аномальными содержаниями, что лишний раз подтверждает преобладание рассеянного состояния этих элементов над концентрированным. Уровень местного геохимического фона уже при длине профилей, превышающих первые километры, с достаточной точностью определяется «на глаз», путем рассмотрения графиков содержаний элементов и проведения усредняющей прямой в области устойчиво низких содержаний рудного элемента. Способ зрительной оценки фона успешно применялся с момента возникновения геохимических методов поисков и его использование по-прежнему оправдано на стадии предварительной интерпретации данных или при детальном изучении уже выявленных аномалий. Недостатками этого способа являются характеристика фона только величиной среднего содержания элемента $C_ф$ без учета степени его постоянства и субъективный выбор нижнего содержания элемента, признаваемого аномальным. Вследствие этого неизбежен пропуск части более слабых аномалий или ошибочное выделение фиктивных аномалий, связанных со случайными колебаниями уровня фона. Поэтому, независимо от того, каким из геохимических методов проводятся работы, для характеристики геохимического фона применяются более строгие методы [21].

Среди отклонений от общего уровня содержаний химического элемента по профилю опробования следует различать явные аномалии, единственным критерием для выделения которых служит коллективный геологический опыт. Примерами такого рода при опробовании горных пород или продуктов их выветривания могут служить содержания меди 0,3 %, свинца 0,1 или 0,5 %, серебра 200 г/т и т. п. Многолетний опыт говорит, что этим геологическим образованиям не свойственны подобные содержания металлов, и такие точки опробования, без дальнейшего обсуждения, рассматриваются в качестве бесспорных (явных) литохимических аномалий. На основании геологического опыта анологичные, безусловно аномальные содержания рудных элементов устанавливаются для природных вод (например, 100 мг/л Cu или 250 мг/л Mo и т. п.), для химического состава растений или для результатов газовых съемок. Априорные представлений о явных геохимических аномалиях позволяют уточнить понятие о местном геохимическом фоне, за величину которого принимается среднее содержание химического элемента в пределах однородного участка, в удалении от явных аномалий.

Другую группу содержаний элементов-индикаторов оруденения, отклоняющихся от среднего уровня, образуют слабые геохимические аномалии, для выделения которых привлекаются вероятностно-статистические критерии. Необходимость именно такого подхода к анализу геохимических данных связана с различиями в содержаниях химических элементов практически в любых двух пробах, в том числе содержаний рудных элементов на заведомо безрудных участках. За пределами явных аномалий эти колебания носят ограниченный характер и обусловлены влиянием множества самых различных причин. Отклонения от фона, не принадлежащие к разряду явных аномалий, только в том случае могут признаваться геохимическими аномалиями, если они с заданной вероятностью превышают амплитуду собственных колебаний местного фона. Для обоснованного выделения слабых аномалий графическая оценка среднего уровня содержаний элемента $C_ф$ недостаточна, необходим одновременный учет меры колебаний местного геохимического фона. Оценку этого важного показателя обеспечивает статистическая обработка геохимических данных (см. 1.5).

В современных условиях добыча полезных ископаемых ведется в основном из месторождений, залегающих в литосфере и относимых к разряду литохимических аномалий. В пределах такой литохимической аномалии выделяются контур промышленных руд и окружающая его зона горных пород с более низкими содержаниями ценных компонентов, недостаточными для их рентабельного извлечения. Зона повышенных содержаний рудных или сопутствующих элементов в околорудных (коренных) породах, образованная одновременно с рудным телом в результате тех же процессов эндогенного, экзогенного (первично-осадочного) или метаморфогенного рудообразования, именуется его первичным ореолом.

Граница между рудным телом и его первичным ореолом часто имеет не геологический, а только временный, экономический смысл, отделяя промышленные руды от забалансовых. При пересмотре требований к среднему содержанию металла в рудах и, следовательно, нижнего промышленного (бортового) содержания форма рудного тела в его границах с первичным ореолом соответственно изменится. Однако понятие о первич-

ном геохимическом ореоле месторождения или рудного тела значительно шире существующего понятия о «забалансовых рудах», внешний контур которых определяется только более низким, нежели бортовое, содержанием ценного металла, и которые в недалекой перспективе могут стать предметом промышленной отработки. Первичный ореол включает зону рудовмещающих пород с содержаниями металлов, лишь в самой незначительной степени превышающих местные фоновые содержания, а также зоны аномальных содержаний элементов-спутников оруденения, не являющихся ценными компонентами залежи. По периферии первичного ореола содержания рудных элементов постепенно (асимптотически) приближаются к фоновым, что определяет сложную конфигурацию и условный характер его внешней границы. В контуре первичного ореола геометрические размеры месторождений в плане и в разрезе значительно превышают размеры рудных тел. В простейшем случае первичный ореол основного рудного элемента повторяет в расширенных границах форму рудного тела (рис. 4). Контуры первичных ореолов элементов-спутников могут существенно отличаться от формы рудных тел (см. гл. 4). Первичные ореолы существуют вокруг залежей любых полезных ископаемых, в частности, нефтяных и газовых месторождений.

Месторождения, образованные на глубине или захороненные в процессе осадконакопления, в результате последующих тектонических поднятий и процессов денудации выводятся к уровню земной поверхности. Возможные при этом последовательные положения денудационного среза относительно крутопадающей залежи схематически показаны на рис. 4. Положение дневной поверхности на уровне *А* отвечает условиям слепого залегания рудного тела, сопровождаемого невскрытым (слепым) первичным ореолом. Уровень *Б* вскрывает только надрудный первичный ореол, денудационная поверхность на уровне *В* вскрывает рудное тело и примыкающий к нему околорудный ореол. Уровень *Г* отвечает стадии, когда рудное тело уже уничтожено денудацией и в коренных породах сохранился лишь подрудный интервал первичного ореола. Дальнейшее понижение денудационной поверхности до уровня *Д* отвечает стадии полной ликвидации гипергенными процессами коренного месторождения и его первичного ореола.

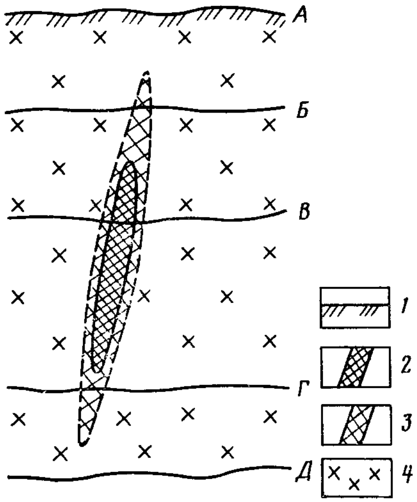


Рис. 4. Уровни денудациоиных срезов (*Б—Д*) крутопадающего рудного тела и его первичного ореола.

1 — первоначальная диевиая поверхность; 2 — рудное тело; *3* — первичиый ореол основиого рудного элемеита; *4* — рудовмещающие породы

Обеспечивая горнопромышленную доступность глубоких горизонтов литосферы, выветривание и денудация одновременно ведут к постепенному уничтожению ранее образованных месторождений полезных ископаемых. Минеральное вещество месторождения, подвергаясь выветриванию и денудации, смешивается с продуктами выветривания окружающих горных пород, растворяется атмосферными осадками и претерпевает разнообразные физико-химические превращения. Химические элементы, находившиеся в рудном теле в состоянии концентрации, при этом рассеиваются в общей массе рыхлых новообразований и природных водах зоны гипергенеза, принимают участие в формировании твердого и гидрохимического стока с суши, поступающего в область осадконакопления, в самом общем случае в мировой океан.

Присутствующие в месторождении или образовавшиеся в зоне выветривания газообразные продукты при этом рассеиваются в атмосфере. С этой точки зрения верхние горизонты современной суши, в которых протекают процессы выветривания и денудации, ведущие к разрушению и ликвидации ранее образовавшихся местных концентраций химических элементов, именуются **полем рассеяния месторождений полезных ископаемых**. Процессы, протекающие в поле рассеяния, могут сопровождаться образованием местных вторичных концентраций химических элементов. Примерами этого являются зоны вторичного сульфидного обогащения, промышленные россыпи или месторождения коры выветривания. Однако в процессах физико-химического, биогенного или механического переотложения вещества, которые ведут к образованию разнообразных вторичных концентраций элементов, значительная часть полезных компонентов также подвергается рассеянию. Последующее поступательное развитие рельефа вовлекает эти вторичные концентрации в новый цикл выветривания и денудации и потому в целом процесс всегда направлен в сторону рассеяния.

На всем интервале уровней *Б—Г* формирование элювио-делювиальных продуктов выветривания протекает с участием соответствующих интервалов полезного ископаемого. Возникающие при этом зоны повышенных (аномальных) содержаний ценных или сопутствующих элементов в окружающих природных образованиях, прилегающие к коренным залежам и обязанные своим происхождением гипергенной миграции химических элементов полезного ископаемого, именуются **вторичными ореолами рассеяния месторождений**. Содержания химических элементов во вторичных ореолах рассеяния месторождений обычно характеризуются промежуточными значениями между высокими содержаниями в полезном иско-

паемом и низкими содержаниями, отвечающими местному геохимическому фону. В плане вторичный ореол рассеяния, в первом приближении, повторяет форму выхода залежи и ее первичного ореола на поверхность коренных пород, обычно значительно превышая их по площади. Обобщенное понятие о вторичных ореолах рассеяния месторождений полезных ископаемых было введено в мировую геологическую литературу Н. И. Сафроновым [34], и послужило основой для развития современных геохимических методов поисков.

Области повышенных содержаний ценных или сопутствующих им элементов на путях твердого, растворимого (водного) или газообразного, поверхностного или подземного стока с суши, развивающиеся за счет вторичных ореолов рассеяния месторождений, принято именовать **потоками рассеяния**. Аномальные содержания химических элементов в потоках рассеяния месторождений характеризуются промежуточными значениями между высокими содержаниями во вторичных ореолах рассеяния и местными фоновыми содержаниями. Потоки рассеяния вытянуты в направлении действующего стока, иногда на многие километры от месторождений, и затухают постепенно по мере приближения содержаний химических элементов к уровню геохимического фона или ограничиваются размерами конечных водоемов стока. В условиях незавершенности процессов рассеяния геохимические аномалии, связанные с физической и химической денудацией месторождения, обнаруживаются в озерах или прибрежной зоне морей и океанов. Вторичные ореолы и потоки рассеяния месторождений могут проявляться в различных геосферах — в химическом составе горных пород, в продуктах их выветривания и почвах, в природных поверхностных и подземных водах, в составе подземной и приземной атмосферы, в растительности и живых организмах. Соответственно этому различают литохимические, гидрохимические, газовые и биогеохимические вторичные (гипергенные) ореолы и потоки рассеяния. На рис. 5 показаны наиболее обычные взаимоотношения рудного тела с его вторичным ореолом и потоком рассеяния в условиях современного горного рельефа, в других случаях эти связи имеют более сложный характер.

Первичные литохимические ореолы месторождений, их вторичные геохимические ореолы и потоки рассеяния, благодаря своим большим размерам и проявлениям у дневной поверхности, более доступны для обнаружения, нежели залегающие на глубине залежи полезных ископаемых. Поэтому обнаружение месторождений возможно путем геохимических поисков их первичных ореолов, вторичных ореолов и потоков рассеяния. Для выявления этих геохимических аномалий — признаков возможного нахождения промышленных месторождений — служат различные высокочувствительные методы. Так, например, при литохимических поисках месторождений золота и ртути анализ горных пород ведется с чувствительностью 10^{-7} %, что соответ-

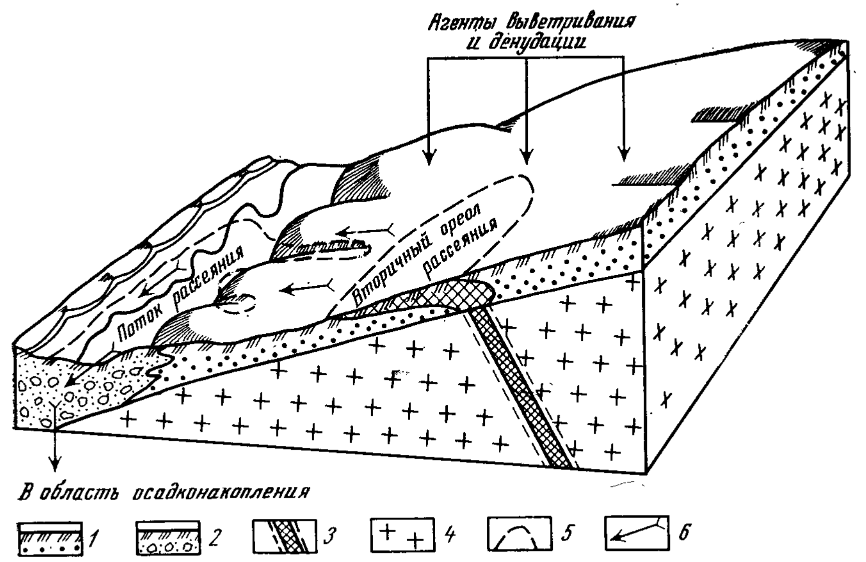


Рис. 5. Блок-диаграмма гипергенного поля рассеяния

1 — элювио-делювий; 2 — аллювий; 3 — рудное тело и его первичный ореол; 4 — рудовмещающие породы; 5 — контур аномальных содержаний рудных элементов в продуктах выветривания, в речной воде и в растительности; 6 — направление стока

ственно в десять тысяч раз и в два миллиона раз меньше обычных содержаний этих металлов в рудах. При геохимических поисках месторождений нефти содержания метана в почвенном воздухе определяются начиная с 10^{-5} %. В зоне выявленной геохимической аномалии после ее детального изучения при благоприятной оценке проходятся горные выработки или буровые скважины с целью вскрытия полезного ископаемого в коренном залегании и его дальнейшей промышленной оценки.

1.4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Исследования геохимического поля с целью поисков месторождений полезных ископаемых ведутся методами геохимических съемок. В основе их лежит систематическое измерение содержаний химических элементов вдоль заранее выбранных направлений-профилей или маршрутов. Система таких прямолинейных, ломаных или криволинейных профилей геохимического опробования, распределенных по площади (или на глубину), образует участок поисковой геохимической съемки, а выявленные при этом геохимические аномалии рассматриваются в качестве объектов, подлежащих оценке. В зависимости от опробуемого вещества, по наименованию исследуемых геосфер различают литохимические, гидрохимические, атмохимические (газовые) и биогеохимические методы поисков и одноименные им виды геохимических съемок. При литохимических съемках

опробуются горные породы на дневной поверхности, по горным выработкам или по скважинам, продукты современного или древнего выветривания горных пород и почвы. При гидрохимических съемках в поисковых целях опробуются природные поверхностные и подземные воды. Атмохимические съемки обычно выполняются путем опробования подземной атмосферы (почвенного воздуха), реже исследуется состав приземной атмосферы. Поисковые биогеохимические съемки обычно ведутся путем исследования химического состава растительности.

По условиям производства различают наземные (пешеходные и автомобильные), воздушные (самолетные и вертолетные) и подземные геохимические съемки. В составе подземных съемок следует различать погоризонтные литохимические съемки в рудниках, скважинные литохимические исследования по керну, геохимический каротаж по стенкам скважин и глубинные геохимические съемки, выполняемые в пределах заданной площади на постоянной глубине от поверхности (более 3 м) или на уровне постоянного геологического горизонта, с пробоотбором или путем погружения специальных датчиков. Аналогичные площадные или профильные съемки на глубине до 3 м принято называть наземными. Съемки могут выполняться на акваториях в подводных (и наводных) вариантах путем опробования речных, озерных или морских отложений и вод, растительных или животных организмов. В поисковых целях могут проводиться геохимические исследования атмосферной пыли, снега или газообразных металлоорганических соединений. Все эти геохимические методы имеют далеко не одинаковое значение для практики поисков. В их числе наибольшее применение получил литохимический метод поисков месторождений твердых полезных ископаемых, в первую очередь рудных месторождений Различные литохимические съемки непрерывно ведутся во всех рудных районах. Более подчиненное значение имеют геохимические методы поисков месторождений горючих ископаемых, в частности, месторождений нефти и газа (см. 6.3). Некоторые методы, например атмохимические, поисков рудных месторождений интенсивно развиваются за последние годы, другие, подобно биогеохимическому, десятилетиями остаются на стадии разработки или их разработка начата только недавно и производственное применение этих методов было бы преждевременным (например, подводные съемки на шельфе, аэрозольные съемки и др.). Основное содержание книги посвящено литохимическим методам поисков рудных месторождений, хотя общие принципы, лежащие в основе применения этих методов, имеют универсальное значение.

Геохимические съемки, как уже указывалось, выполняются с отбором или без отбора проб, с точечными дискретными или непрерывными определениями содержаний химических элементов по профилям. При геохимических съемках с пробоотбором число химических элементов, содержания которых определяются

в пробах максимально при больших размерах исследуемой площади, мелком масштабе съемок и слабой геологической изученности территории. При поисковых литохимических съемках в пробах определяются содержания до 35—40, иногда до 50—55 химических элементов. В настоящее время еще нет контактных или дистанционных методов, с помощью которых можно было бы без пробоотбора одновременно определять содержания многих элементов с чувствительностью, отвечающей требованиям поисковых геохимических съемок. Обычно геохимические съемки без пробоотбора ведутся на какой-либо один химический элемент, например Be, B, F или Hg, реже на сумму нескольких рудных элементов (прибор «Поиск»). Наибольшее и весьма эффективное применение получили гамма-спектральные пешеходные, автомобильные и особенно аэрогеохимические съемки, при которых одновременно определяются содержания U (по Ra), Th и K (по радиоактивному изотопу ^{40}K).

По целевому назначению геохимические съемки делятся на: рекогносцировочные, при необходимости выполняемые в масштабе 1 : 1 000 000 и мельче; собственно поисковые, последовательно выполняемые на всей территории горнорудных районов в масштабе 1 : 200 000 а затем в масштабе 1 : 50 000 детальные (поисково-оценочные), в масштабе 1 : 10 000 на выборочных участках; разведочные — в масштабах 1 : 1000 и крупнее в пределах рудных полей разведываемых и эксплуатируемых промышленных месторождений. Производство геохимических съемок от мелкомасштабных к наиболее детальным увязывается со стадиями единого геологоразведочного процесса, принятыми в нашей стране.

Для отнесения геохимических съемок к определенному масштабу плотность наблюдений должна составлять не менее одной точки на 1 см² отчетной карты. Поскольку квадратные съемочные сети применяются редко и не рекомендуются практикой, шаг по профилю Δx всегда меньше расстояния между профилями $2l$. В итоге масштаб съемок определяется расстоянием между профилями (маршрутами), которое независимо от шага опробования по профилю должно составлять 1 см в масштабе отчетной карты. Эти универсальные требования распространяются на все виды лито-, гидро-, атмо- и биогеохимических съемок, в том числе при непрерывных измерениях, не оставляя места для произвольных толкований [21]. Широкий простор для инициативы исполнителей сохраняется в плане совершенствования методики геохимических исследований, в результате которого поставленная геологическая задача могла бы решаться поисковыми съемками более мелких масштабов (или с большим шагом наблюдений), чем это практиковалось ранее.

Каждый из геохимических методов имеет свою область эффективного применения и предпочтительные масштабы, в которых наиболее целесообразно производство соответствующих съемок. Правильный выбор метода и масштаба съемки опреде-

ляет геологическую эффективность работ. Геохимическим съемкам любых видов придается прямая поисковая направленность с признанием за ними роли объективного средства выявления признаков **реальной рудоносности** территорий. Геохимические методы установления «потенциальной» рудоносности не рассматриваются, так как многолетний опыт показал, что оценку потенциальной рудоносности района легко получить на основании анализа листов государственной геологической карты масштаба 1 : 1 000 000 на основе принципов металлогенического анализа. Территорий, не имеющих геологической карты, к настоящему времени в мире уже нет. Итогом поисковых геохимических съемок во всех случаях должно быть выявление участков реальной рудоносности, с оценкой (в цифрах) их прогнозных ресурсов металла.

1.5. ПАРАМЕТРЫ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Попытки установления конкретных причин отклонения фоновых содержаний элемента в каждой отдельной точке опробования от их среднего уровня лишены практического смысла и заведомо обречены на неудачу. В пределах однородного участка анализ геохимического фона осуществляется путем подсчета частости появления различных содержаний рассматриваемого элемента. Отвлекаясь от причин колебаний фоновых содержаний химических элементов в каждой отдельной точке геохимического поля, мы рассматриваем эти содержания в качестве случайных величин, характеристикой которых служат оценки параметров их статистических распределений. Такой анализ позволил установить, что статистические распределения фоновых содержаний приближенно подчиняются нормальному закону, имеющему важное значение во многих разделах науки. Широкое распространение этого закона в природе и технике находит объяснение в центральной предельной теореме А. М. Ляпунова (1900 г.), согласно которой нормальное распределение обнаруживается в условиях, когда изменение наблюдаемой величины X определяется соизмеримыми и независимыми влияниями большего числа различных причин [8]. Именно таким одновременным влиянием разнообразных геологических, геохимических, биоклиматических, технических и многих других причин определяются фоновые содержания элементов в горных породах, почвах, водах и других природных образованиях. Функция нормального распределения выражается уравнением:

$$y=\varphi(x)=\frac{1}{s\sqrt{2\pi}}\,e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s^2}}, \qquad (3)$$

где $\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i$ — среднее арифметическое значение x, которое в пределе при числе данных $N\to\infty$ стремится к своему математическому ожиданию; $s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N-1}}$ — среднее квадратическое или стандартное отклонение случайных значений x от $\bar{x}$; s^2 — дисперсия x.

Нормальному закону (3) могут приближенно подчиняться распределения частостей $y=\frac{n_i}{N}$ содержаний какого-либо элемента в пробах, где n_i — число проб с содержанием $C_{i-1}\leqslant x\geqslant C_{i+1}$ в процентах. В других случаях выражению (3) подчиняются распределения частостей логарифмов содержаний элементов и оно приобретает смысл логарифмически нормального закона, при котором $x=\lg C_i$. Н. К. Разумовский еще в 1939 г. показал, что логнормальному закону обычно подчиняются частости различных содержаний рудных элементов в породах и рудах, размеров золотинок в россыпях и многих других геологических признаков. Распределения содержаний макроэлементов в горных породах приближенно подчиняются нормальному закону. Хотя наблюдаемые в природе распределения химических элементов могут отличаться от нормального или логнормального, в большинстве случаев для однородных геологических совокупностей обнаруживается удовлетворительное совпадение с этими законами. Параметры $\bar{x}$ и s исчерпывающе полно характеризуют распределения, подчиняющиеся нормальному закону, свойства этого закона хорошо изучены и потому близость к нему природных распределений широко используется при геохимических исследованиях. Однако принимаемое за основу нормальное распределение содержаний элементов или их логарифмов — не более чем удобная аппроксимация, т. е. приближенное описание наблюдаемых закономерностей. Нормальный закон распределения допускает с определенной частостью $y>0$ появление проб **с отрицательным содержанием элемента**, что является геологическим абсурдом. Логнормальный закон свободен от этого недостатка, однако, подобно нормальному закону, допускает существование проб с содержаниями элемента >100 %, что в равной мере бессмысленно. Поэтому любая из этих зависимостей не может рассматриваться в качестве теоретического закона, которому подчиняются распределения содержаний элементов в природных образованиях, и речь идет только о практических удобствах их использования.

Кривая нормального распределения имеет колоколообразную форму с одним максимумом в точке $\bar{x}$ и симметрична относительно прямой $x=\bar{x}$. Для нормального распределения величина $\bar{x}$ отвечает наиболее часто встречающемуся значению случайной величины x или ее моде и, благодаря симметрии

распределения, совпадает с его медианой — значением, отвечающим середине ранжированного ряда, т. е. делящем всю совокупность данных пополам. Равенство среднего арифметического, моды и медианы является важнейшим свойством нормального распределения. Это позволяет дополнить ранее приведенное определение геохимического фона $C_ф$, величине которого одновременно отвечают среднее, наиболее часто встречающееся (модальное) и медианное содержания элемента в однородном участке. При этом 1/2 всех точек в области фона имеет содержания элемента $C_x \leqslant C_ф$ и 1/2 — содержания $C_x \geqslant C_ф$. Вычисленные теоретические значения функции нормального распределения для случая $\bar{x}=0$ и $s=1,0$ приводятся во всех математических справочниках, курсах теории вероятностей и математической статистики [7]. Там же приводятся таблицы значений интегральной функции

$$\Phi(x_а) = \int_{-x_а}^{x_а} \varphi(x)\,dx = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_а} e^{-\frac{x^2}{2}}\,dx, \qquad (4)$$

характеризующей вероятность того, что случайная величина x, распределенная нормально, по абсолютной величине не превзойдет заданного значения $x_а$. Табличные значения интеграла вероятностей $\Phi(x)$ имеют смысл двухстороннего критерия, в то время как в практике поисков преобладающее значение имеют положительные геохимические аномалии, т. е. содержания элементов, превышающие величину $C_ф$. Вероятность того что случайная величина x не превысит соответствующего верхнего предела, будет $0,5+1/2\ \Phi(x_а)$. Некоторые значения этих вероятностей приведены в табл. 3 с одновременным указанием вероятности противоположного события, т. е. того, что величина x случайно превзойдет заданный предел $x_а$.

Распространяя эти данные на закономерность случайных колебаний геохимического фона, можно выбрать некоторое пороговое содержание элемента $C_А > C_ф$, начиная с которого превышения над фоном будут считаться геохимическими аномалиями. Вероятность попадания в их число случайных колебаний

Таблица 3

Нормальное распределение x

Верхний предел $x_а$	Вероятность того, что x не превысит $x_а$, %	Вероятность противоположного события, %	Верхний предел $x_а$	Вероятность того, что x не превысит $x_а$, %	Вероятность противоположного события, %
$\bar{x}+s$	84,13	15,87	$\bar{x}+3s$	99,86	0,14
$\bar{x}+2s$	97,72	2,28	$\bar{x}+4s$	99,997	0,003
$\bar{x}+2,33s$	99,0	1,0			

фона будет зависеть от выбора величины $t>0$, определяющей верхний предел этих колебаний

$$x_а = \bar{x} + ts \qquad (5)$$

и нижнее аномальное содержание элемента $C_А$. В каждом конкретном случае определение $C_А$ требует оценки численных значений параметров местного геохимического фона $\bar{x}$ и s. В зависимости от нормального или логнормального закона, которым аппроксимируется статическое распределение фоновых содержаний элемента, величины $\bar{x}$ и s будут выражаться в процентах (мг/л, г/т и т. п.) или в логарифмических единицах.

Выбор величины t нельзя строго обосновать. Если принять $C_А$ на уровне $t=4,0$, вероятность ошибочного отнесения колебаний фона в разряд геохимических аномалий будет ничтожна (см. табл. 3), однако при этом будет утрачена часть слабых аномалий, лишь незначительно отличающихся от уровня $C_ф$. Эти аномалии могут иметь важное значение, в частности, при поисках месторождений, залегающих на большой глубине. Если принять $C_А$ на уровне $t=1,0$, слабые аномалии будут выделены для последующего изучения, но при этом к их числу будут ошибочно отнесены еще 15,87 % всех фоновых содержаний элементов. При поисковых геохимических работах общее число этих фиктивных аномалий, обусловленных только случайными колебаниями геохимического фона, может достигнуть нескольких тысяч. Геологический осмотр, детализация и проверка такого числа аномалий невозможны, так как без внимания могут быть оставлены те немногие рудные аномалии, которые входят в их число, и в итоге геохимические поиски окажутся безрезультатными.

Для определения содержаний элементов в геохимических пробах широко применяется спектральный анализ, погрешности которого подчиняются логнормальному закону. Этому же закону подчиняются распределения случайных погрешностей многих других методов экспресс-анализа при большом размахе содержаний элемента в пробах. Погрешности анализа входят в качестве слагаемого $s_{техн}$ в стандартное отклонение фона s. Согласно теореме о сложении дисперсий [8]:

$$s = \sqrt{s^2_{прир} + s^2_{техн}}\,. \qquad (6)$$

Поскольку $s_{техн}$ имеет смысл логарифмической величины, статистические распределения содержаний микроэлементов при спектральном анализе проб должны аппроксимироваться логнормальным законом. Невозможность появления отрицательных и противоречащих закону Вернадского нулевых содержаний элементов является одним из достоинств логнормального распределения. В соответствии с этим выражение (5) приобретает смысл зависимости между логарифмическими величи-

нами: $x_a = \lg C_A = \lg \tilde{C}_i + t s_{\lg}$. Освобождаясь от логарифмов, имеем:

$$C_A = \tilde{C}_x \varepsilon^t, \tag{7}$$

где $\tilde{C}_x = C_ф$ — среднее геометрическое содержание элемента в пределах фонового участка

$$\tilde{C}_x = \operatorname{antlg}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lg C_i\right)^*.$$

Величину $\varepsilon = \operatorname{antlg} s_{\lg}$ принято именовать «стандартным множителем». С учетом высказанных выше соображений о выборе величины t, за нижний уровень аномальных содержаний элементов для выделения слабых аномалий, зафиксированных одной точкой наблюдения, при геохимических поисках принимается:

$$C_{A1} \geqslant C_ф \varepsilon^3. \tag{8}$$

Эта зависимость отвечает критерию «трех стандартных отклонений» $(+3s_{\lg})$, широко применяемому во многих разделах техники для выделения величин, выходящих за пределы вероятных значений случайной величины, распределенной по нормальному закону. Для выделения слабых аномалий, образованных группой смежных точек наблюдения с повышенными содержаниями элемента-индикатора, не достигающими уровня C_{A1}, практикуется снижение порогового содержания, согласно критерию

$$C_{A,m} \geqslant C_ф \varepsilon^{3/\sqrt{m}}, \tag{9}$$

где $m = 2, 3, 4, \ldots, 9$ — число точек, допускающих объединение на геохимической карте в один общий аномальный контур.

В данном случае справедливо предполагается, что повышенные содержания элемента $C_x > C_ф\varepsilon$, обязанные случайным колебаниям фона, будут распределены в пределах участка равномерно-беспорядочно, в виде изолированных одиночных точек. В противоположность этому, даже очень слабые, но реальные аномалии будут тяготеть к структурам, контролирующим размещение полезных ископаемых, закономерно прослеживаясь на смежных профилях, образуя группы геологически коррелирующихся точек с общими контурами. Прогрессивное снижение C_A ограничивается уровнем $C_ф\varepsilon$ при любых значениях $m > 9$, так как вероятность появления повышенных содержаний элемента по мере приближения к $\tilde{C}_x$ стремится к 50 % и признак геологической коррелируемости содержаний $C_x > C_ф$ теряет свою определенность. Число выделяемых при этом фиктивных аномалий сверх вероятного их числа 0,14 %, определяемого критерием ε^3 (см. табл. 3), увеличивается лишь незначительно.

* Здесь и в дальнейшем горизонтальная черта над буквенным символом величины обозначает среднее арифметическое, волнистая черта — среднее геометрическое значение.

Оценки статистических параметров геохимического фона $C_ф\varepsilon$ и определение нижних аномальных значений C_{A1} — $C_{A,m}$ проводятся на ЭВМ или методами «ручного счета», по объективно случайным (рандомизированным) выборкам ограниченного объема, чаще всего путем построения графика накопленной частости различных фоновых содержаний на бланках вероятностной бумаги [42] или на микрокалькуляторах [10]. Определения проводятся для каждого элемента или для их обоснованно выбранной совокупности, для однородных участков геохимического поля. При обработке на ЭВМ всех имеющихся данных представления о ступенчато-постоянных уровнях геохимического фона заменяются более близкой к природе геохимического поля аппроксимацией фона криволинейной поверхностью тренда.

Знание параметров местного геохимического фона позволяет уточнить понятие о геохимических аномалиях, об их эффективных размерах и показателях контрастности. Геохимической аномалией следует именовать замкнутый объем V, в пределах которого численные значения геохимического поля во всех точках равны или больше заданной величины C_A. В двухмерном пространстве геохимическую аномалию ограничивает замкнутый контур площадью S, в сечении по профилю аномалию характеризует ее ширина 2a. Достаточно очевидно, что при этом размеры и форма аномалий прямым образом зависят от выбора нижнего уровня содержаний химического элемента C_A, на котором производится их оконтуривание. Так, например, при литохимических съемках в Центральном Казахстане в 1948—1953 гг. медь фиксировалась в пробах начиная с 0,04 % (иногда даже с 0,07 %!), хотя истинная чувствительность анализа уже в те годы могла быть принята 0,0001 % меди. В этих условиях эффективная (т. е. наблюденная) ширина геохимической аномалии, изображенной на рис. 6, по результатам детальных съемок с шагом опробования 10 м оценивалась в 27 м. Та же аномалия, оцениваемая на уровне $C_A = 2 \cdot 10^{-2}$ %, имела бы эффективную ширину 2a = 40 м, а на уровне $C_A = 1 \cdot 10^{-2}$ % — 2a = 60 м. Дальнейшее снижение величины C_A до $8 \cdot 10^{-3}$ % дало бы основание оценивать эффективную ширину этой аномалии в 68 м и т. д. Ни одна из этих линейных величин не может рассматриваться в качестве параметра, с тем или иным приближением характеризующего природные размеры аномалии, которые не поддаются строгому определению.

Условием обнаружения аномалии при геохимических съемках является попадание в ее контур хотя бы одной точки наблюдений. Поэтому геометрические размеры аномалий следует определять в границах $C_x \geqslant C_{A1} = C_ф\varepsilon^3$. Величина стандартного множителя ε, согласно (6), зависит от технической точности геохимических исследований, с повышением которой за счет уменьшения слагаемого $s^2_{техн}$ величина ε^3 и, следовательно, C_A снижаются, и размеры аномалий увеличиваются. По своей пе-

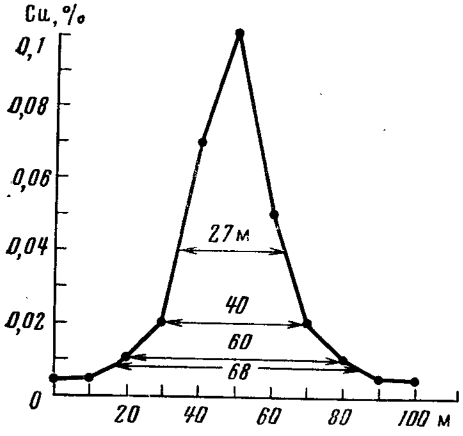


Рис. 6. График изменения эффективной (наблюдаемой) ширины геохимической аномалии в зависимости от чувствительности анализа проб и выбора нижнего аномального содержания меди

риферии геохимические аномалии асимптотически приближаются к уровню местного фона, их размеры не поддаются строгому определению и могут многократно изменяться в зависимости от погрешностей съемок. Поэтому следует говорить только об «эффективных» или «выявленных» размерах геохимических аномалий, не являющихся свойствами химических элементов, но имеющих важный технический смысл. Попытки определения «истинных» размеров аномалий основаны на недоразумении. Оконтуривания аномалий возможны и на других более низких внешних уровнях $C_{A,m}$ в интервале до $C_{A9} = C_ф\ \varepsilon$ при $m \geqslant 9$. Выбор внутренних контуров аномалий, кратных величине стандартного отклонения $C_ф + ts$ (или $C_ф \varepsilon^t$) со значениями $t \gg 3$, лишен математического или геохимического смысла. Высокие внутренние контуры («изоконцентраты») и максимальные содержания химических элементов C_{max} в явных аномалиях следует выражать в процентах, в граммах на тонну или других обычных единицах.

Характеристику аномалий, наряду с размерами, определяет их контрастность, за которую нередко ошибочно принимают величину отношения C_{max} к $C_ф$. Правильная оценка этого важного показателя требует сопоставления аномалий не только с уровнем фона, но и с его устойчивостью, мерой которой служит стандартное отклонение s (или ε). Если бы местный геохимический фон оставался во всех точках поля абсолютно постоянным ($s = 0$, $\varepsilon = 1{,}0$), обнаружение сколь угодно слабой аномалии при сколь угодно высоком фоне не представляло бы никаких трудностей. Поэтому показателем контрастности слабых аномалий γ служит «отношение уровня полезного сигнала к уровню шума». Это определение, заимствованное из области радиотехники, получило общенаучное применение для характеристики слабых индикаций, проявленных на фоне помех. В нашем случае полезный сигнал — это амплитуда геохимической аномалии C_{max} за вычетом фона, а уровень помех — величина стандартного отклонения фона. Следовательно,

$$\gamma = \frac{x_{max} - x_ф}{s}, \qquad (10)$$

или, с учетом логнормального распределения содержаний микроэлементов

$$\gamma = \frac{\lg C_{max} - \lg C_ф}{s_{\lg}} = \frac{1}{\lg \varepsilon} \cdot \lg \frac{C_{max}}{C_ф}. \qquad (11)$$

На рис. 7 приведен пример сравнения контрастности двух слабых аномалий, имеющих одинаковое превышение над уровнем фона $C_{max} - C_ф = 20$, при разных параметрах геохимического фона.

Выражение (11) является основным для оценки контрастности слабых геохимических аномалий при сравнении эффективности различных геохимических методов их выявления. При значениях $\gamma \gg 3$ аномалия доступна для выявления уже одной точкой наблюдения, при $1 \leqslant \gamma < 3$ для ее выявления необходимо попадание в контур аномалии C_A, соответственно m точек, где $m = 2, 3 \ldots 9$, при значениях $\gamma < 1$, согласно критерию (9), аномалия над объектом не обнаруживается. Это не значит, что она отсутствует, в этом случае обнаружение аномалии возможно с применением специальных математических методов обработки имеющихся данных или с использованием других методов исследования геохимического поля, обеспечивающих увеличение показателя сигнал-помеха. Вычисление показателя контрастности (11) уместно только для слабых аномалий, амплитуду явных аномалий характеризует абсолютное значение C_{max}.

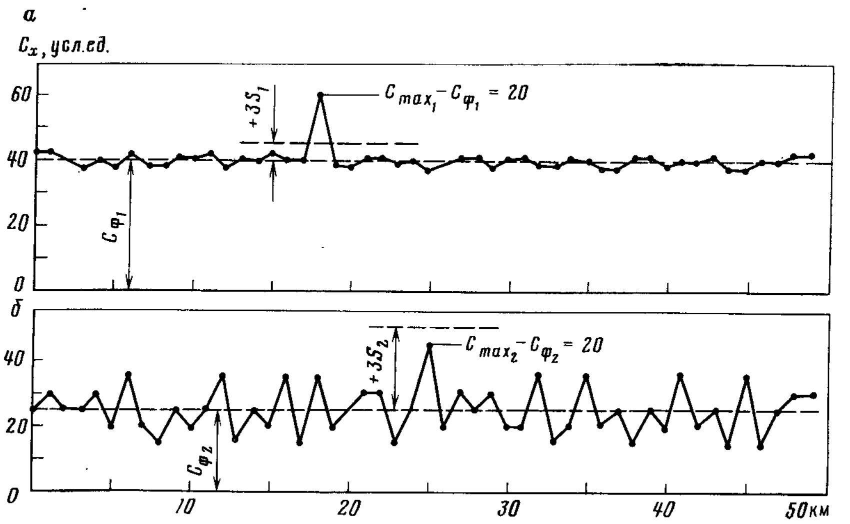


Рис. 7. Сравнение контрастности двух слабых аномалий при разных параметрах фона:
$а - C_{ф_1} = 40$; $S = 1{,}5$; $C_{A1} = 45$; $\gamma \gg 3$ и $б - C_{ф_2} = 25$; $S_2 = 7{,}6$; $C_{A2} = 50$; $\gamma < 3$

Оценка параметров местного геохимического фона является обязательной для надежного выделения аномалий, сопоставления их эффективных размеров, определения показателя контрастности слабых аномалий и сравнения эффективности различных методов и технических приемов исследования геохимического поля. В то же время статистический анализ фоновых участков поля является необходимым, но только начальным условием количественного анализа геохимических данных. Геологические результаты поисков определяет анализ не фоновых, а именно аномальных участков поля. В зонах геохимических аномалий содержания элементов носят пространственно-упорядоченный (детерминированный) характер, для анализа которых методы математической статистики неприменимы или имеют ограниченное применение.

Статистические оценки среднего значения и дисперсии каких-либо данных имеют смысл при условии однородности этих данных. Только в этом случае выборка способна правильно характеризовать генеральную совокупность данных и увеличение объема выборки уточняет оценки. Несостоятельность тех же статистических оценок при нарушении условия однородности иллюстрируют простые примеры (рис. 8), смысл которых можно отнести к результатам любого геохимического опробования.

По данным анализа n_1 проб, отобранных в пределах однородного гранитного массива, в удалении от его эндоконтактов, могут быть найдены оценки среднего $\overline{C_1}$ и стандартного отклонения s_1 содержаний какого-либо элемента. Если, не выходя за пределы массива, продлить опробование, отобрав дополнительно n_2 проб, оценки $\overline{C_2}$, s_2 по n_1+n_2 пробам будут уточнять первоначально полученные данные, не изменяя их существа. И первые, и вторые оценки являются объективными характеристиками этих гранитов, численные значения их с увеличением объема опробования сходятся по вероятности к своему истинному значению (с учетом принятого способа опробования и точности анализа). Если профиль опробования пересечет зону контакта, выйдя во вмещающие эффузивы с другим содержанием определяемого элемента, оценки $\overline{C_3}$ и s_3 по n_3 пробам или по совокупности $n_1+n_2+n_3$ проб не будут иметь устойчивого геохимического смысла, целиком завися от произвольных соотношений между числом проб, отобранных из гранитов и эффузивов (см. рис. 8, *а*). Такие выборки, составленные путем *смешения* неоднородных данных, непригодны для статистической обработки. Для оценки средних и стандартных отклонений содержаний элементов по результатам опробования двух разных пород исходные данные необходимо предварительно разделить на однородные совокупности.

Примерами неоднородных данных, для которых оценки статистических параметров распределения лишены устойчивого смысла, являются содержания рудных элементов в аномалиях.

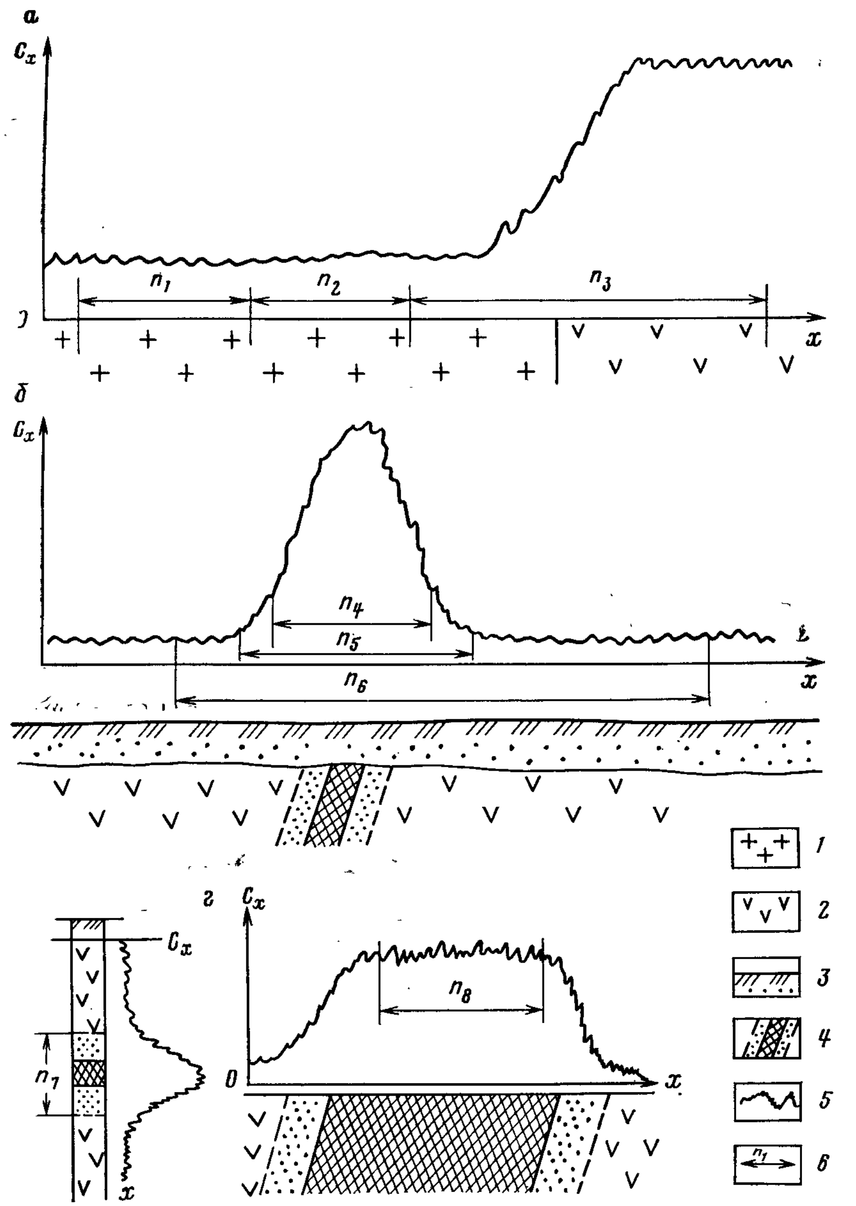


Рис. 8. Графики однородных «случайных» (пробы n_1, n_2, n_8) и неоднородных пространственно-упорядоченных (пробы n_3—n_7) содержаний рудного элемента:

а — в гранитах (*1*) и основных эффузивах (*2*); *б*—*в* элювио-делювии (*3*); *в* — в керне скважины; *г* — в штокверке; *4* — рудное тело и его первичный ореол; *5* — графики содержаний рудного элемента; *6* — интервалы геохимического опробования

Любые оценки среднего и стандартного отклонения содержаний металла в зоне геохимической аномалии (см. рис. 8, *б*) по n_4, n_5 или n_6 пробам произвольно изменяют свои значения в зависимости от субъективно выбираемых границ подсчета. Это же относится к анализу статистического распределения содержания металла в рудном теле и околорудных породах по данным геохимического опробования керна разведочной скважины (см. рис. 8, *в*). Напомним, что границы геохимической аномалии не поддаются строгому определению. Поэтому любые оценки $\overline{C}_7$ и s_7 для аномалий, найденные по n_7 (или n_4) пробам, зависели бы от выбора C_A и не могут рассматриваться в качестве природных характеристик объекта. Это не исключает существования условий, в которых оценки среднего значения и дисперсии содержаний металла в рудной зоне приобретают смысл объективных величин. Пример такого рода показан на рис. 8, *г* для случая мощной залежи (например, штокверка), в центральной части которой наблюдаются «случайные» колебания содержаний металла около некоторого постоянного уровня. В этом случае в интервале опробования n_8 в удалении от границ рудного тела содержания металла в пробах имеют характер однородной совокупности данных и статистические параметры $\overline{C}_8$, s_8 будут устойчиво характеризовать этот и однотипные интервалы оруденения.

Оценки средних содержаний и дисперсии в качестве устойчивых величин могут существовать и для совокупности разных горных пород или других различных природных образований, объединяемых в тех или иных целях. Условиями для этого являются большое число объединяемых разностей (например, типов пород, типов ландшафтов) и малые размеры отдельных неоднородностей по сравнению с размерами изучаемого объекта, что обеспечивает представительность выборочных данных. Примером этого служат кларки геосфер, значения которых несомненно имеют объективный статистический и геохимический смысл.

Для анализа пространственно-упорядоченных детерминированных распределений содержаний элементов в геохимических аномалиях служит аппарат основных уравнений математической физики. В задачу этого анализа входит установление причинных (каузальных) связей между содержаниями элемента и пространственными координатами, длительностью процессов, параметрами геологической среды и свойствами химического элемента. Отыскание таких аналитических зависимостей, определяющих формирование геохимических аномалий в различных геосферах, ведется путем рассмотрения упрощенных, идеализированных моделей процесса. Частью эти зависимости устанавливаются путем заимствования решений из области дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, диффузии, материального баланса, кинетики химических реакций или гидродинамики. Найденные физико-математические зависимости типа (1)—(2) служат для количественного анализа выявленных геохимических аномалий, с учетом тех отступлений от идеальной картины, которые неизбежны в реальной природной обстановке. Создание математической теории формирования геохимических аномалий для каждого отдельного химического элемента, естественно, невозможно и нецелесообразно. Поэтому при выводе общих законов, управляющих аномальным геохимическим полем, рассматривается поведение некоторого абстрактного элемента или металла. Индивидуальные свойства химических элементов учитываются в численных значениях коэффициентов, входящих в установленные функциональные зависимости.

Для серии численных величин, характеризующих однотипные аномальные поля, возникает необходимость оценки их средних значений и доверительных интервалов, дисперсий и корреляционных зависимостей между ними. Таким образом, математический анализ аномальных полей на основе детерминированных моделей сочетается с вероятностно-статистической оценкой его результатов. Деление задач поисковой геохимии на два класса, решаемых на основе детерминированных и вероятностно-статистических моделей, в известной мере условно. Любые природные «случайные» распределения не беспричинны, и в природе нет упорядоченных распределений, которые не имели бы случайной составляющей. Однако граница между этими классами задач и методами математического анализа геохимических полей обнаруживается достаточно четко. В этом плане первостепенное значение имеют понятия о *параметрических и непараметрических* геохимических показателях.

Геохимическими параметрами следует именовать величины, имеющие объективный смысл, численные значения которых уточняются одновременно с увеличением точности исследований. Так, например, параметрической величиной является среднее содержание свинца в однородной горной породе, величина которого уточняется одновременно с увеличением числа исследуемых проб и с переходом к более совершенным методам их анализа. Численные значения непараметрических показателей не поддаются строгому определению, величины их *произвольно изменяются* с увеличением точности исследований или *заранее известны*. Характерными непараметрическими показателями являются «встречаемость» химических элементов, которая, согласно закону Вернадского, всегда равна 100% или размеры геохимических аномалий (см. рис. 4). Непараметрический смысл имеют оценки средних содержаний элементов в геохимических аномалиях (см. рис. 8), протяженность любых геохимических аномалий в гидросети вследствие их асимптотического приближения к фону или ограничения бли-

зостью конечного водоема стока и т. п. Некоторые непараметрические показатели имеют важный технический смысл — например, среднее содержание металла в рудном теле (зависит от субъективно выбираемого бортового содержания) или эффективные размеры геохимических аномалий в контуре нижнего аномального содержания. Однако численные значения любых непараметрических показателей не являются природными характеристиками объектов. Сравнение их с атомными весами элементов, валентностями, радиусами ионов, ионными потенциалами, растворимостью соединений и другими объективными характеристиками вещества или ранжирование рудных элементов по величине непараметрических показателей совершенно недопустимо. Для обоснования каких-либо теоретических или устойчивых методических выводов эти показатели служить не могут.

В ряде случаев от непараметрических показателей легко перейти к значениям геохимических параметров, использование которых для характеристики геохимического поля всегда предпочтительно. Например, среднее содержание рудного элемента в аномалии и ширина этой аномалии по профилю являются непараметрическими величинами. Первая из них, за вычетом фона, в пределе стремится к нулю, вторая — к бесконечности, или:

$$\lim(\bar{C}_{\text{А}} - C_{\text{ф}}) \to 0; \qquad \lim 2a \to \infty. \tag{12}$$

Однако любое произведение этих двух взаимосвязанных и достаточно неопределенных величин приводит к вполне устойчивому параметрическому показателю, характеризующему количество металла (в метропроцентах) в данном сечении аномалии или

$$2a(\bar{C}_{\text{А}} - C_{\text{ф}}) = \text{M}. \tag{13}$$

Величина этого объективного геохимического показателя, именуемого линейной продуктивностью аномалии, уже при соблюдении минимальных требований к ее подсчету оценивается с достаточной точностью (которая возрастает одновременно с увеличением детальности исследований и точности анализа проб). Важнейший параметрический смысл для характеристики геохимической аномалии имеет аналогичный показатель площадной продуктивности

$$P = S(\bar{C}_{\text{А}} - C_{\text{ф}}). \tag{14}$$

Эта величина характеризует надфоновое количество (в м^2%) химического элемента, заключенное в контуре аномалии на плоскости, служит критерием для сопоставления аномалий и, подобно параметру М, не зависит от субъективных решений. Геохимическим параметром является и надфоновое количество химического элемента Q в тоннах, заключенное в объеме конкретной аномалии. Замечательным свойством показателей линейной, площадной и объемной продуктивности геохимических аномалий является независимость их величин от масштабов тех геохимических съемок, по данным которых ведутся подсчеты. Покажем это на примере оценки параметра P для фиксированной площади S_0, на которой наряду с фоновыми содержаниями рудного элемента развиты литохимические аномалии различных размеров. Предельно полно этот участок был бы изучен при непрерывных наблюдениях и бесконечно малом расстоянии между профилями ($\Delta x \to 0$; $2l \to 0$) с бесконечно большим числом наблюдений $N_0 \to \infty$, образующим генеральную совокупность данных. При фиксированных значениях S_0 и $C_{\text{ф}}$ истинное значение P согласно (14) определяется математическим ожиданием величины $\bar{C}_x$. Величину P с заранее заданной точностью можно найти, определяя C_x по данным равномерно-случайной выборки с числом наблюдений $N < N_0$, что вытекает из несмещенного характера оценки среднего. По смыслу это отвечает разрежению съемочной сети до предела, при котором N остается представительной выборкой. При этом условии оценки P остаются правильными независимо от масштаба съемки, уточняясь с увеличением плотности наблюдений.

Подсчеты линейных и площадных продуктивностей геохимических аномалий при равномерной сети наблюдений обычно ведутся по формулам, идентичным (13) и (14):

$$\text{M} = \Delta x\left(\sum_{x=1}^{n} C_x - nC_{\text{ф}}\right); \tag{15}$$

$$P = \Delta \bar{x} 2l\left(\sum_{x=1}^{N} C_x - NC_{\text{ф}}\right). \tag{16}$$

Если предварительно оцениваются величины M_i по каждому из m профилей, секущих аномалию, подсчет P ведется по формуле

$$P = 2l\sum_{i=1}^{m} \text{M}_i. \tag{17}$$

Таким же образом ведется оценка P при непрерывных наблюдениях по профилю. В последнем случае величины линейных продуктивностей аномалий определяются как площади, ограниченные графиком $C_x = f(x)$ и линией местного фона. Из выражения (16) видно, что при подсчетах P любой, даже самой короткой аномалии формально приписывается длина $2l$ (и ширина Δx). Следовательно, если длина аномалии $2b < 2l$, ее продуктивность будет преувеличена в l/b раз. Однако из общего числа всех аномалий этой длины съемками данного масштаба будет выявлена только часть, пропорциональная отношению b/l и подсчеты P будут верными. Повторяя эти рассуж-

2 Заказ № 405

дения для случая $2a<\Delta x$, приходим к уже сделанному выводу о независимости подсчетов P от масштаба геохимической съемки при любых соотношениях S и ΔS. При подсчете по достаточно большой площади оценка P характеризует суммарную продуктивность как выявленных, так и пропущенных съемкой аномалий, и это является важнейшим свойством этого параметра. Все сказанное относительно независимости от масштаба съемок распространяется и на подсчеты надфоновых количеств химического элемента в объеме конкретной аномалии или достаточно большого трехмерного участка геохимического поля. Термин «объемная продуктивность» в практике геохимических поисков применения не получил и соответствующие величины принято именовать «геохимическими запасами» данного элемента в конкретном объеме, в частности, до глубины H м или для слоя 1 м, выражая их в тоннах и обозначая символами Q_H или q т/м. В соответствующих случаях та или иная доля геохимических запасов может приобретать смысл прогнозных оценок ресурсов полезного ископаемого, а затем цифр промышленных запасов. Зависят от выбранного бортового содержания металла, промышленные запасы, в отличие от геохимических, являются непараметрической величиной.

Другим важнейшим свойством показателей, характеризующих надфоновое количество какого-либо элемента в геохимической аномалии, является наличие пропорциональных зависимостей между этими параметрами для различных категорий взаимосвязанных аномальных полей. Так, например, в широком диапазоне геологических условий соблюдается прямая пропорциональность между продуктивностью коренного оруденения (M_pм %, P_pм^2 %) и продуктивностью его вторичного литохимического ореола рассеяния (M, P) в элювио-делювии, или

$$M = kM_p; \quad (18)$$

$$P = kP_p, \quad (19)$$

где $k \gtrless 1{,}0$ — местный коэффициент продуктивности.

Не подлежит сомнению, что надфоновые количества металла в гидрохимических, биогеохимических, газортутных и ряде других аномалий в свою очередь пропорциональны продуктивностям вторичным литохимических ореолов рассеяния и коренного оруденения. Простейшие зависимости (18) и (19) принадлежат к фундаментальным положениям поисковой геохимии, они в значительной мере определяют методику геохимических съемок и принципы интерпретации их данных.

Особенностью геохимического поля является его многомерность, поскольку при геохимических поисках одновременно определяются содержания большого числа химических элементов. Соответственно этому характеристику поля дополняют сведения о корреляционных зависимостях и численных соотношениях между содержаниями элементов или их продуктивностями. В любой точке геохимическое поле характеризуется своими

градиентами вдоль осей пространственных координат и направлением максимальной изменчивости. Подобно другим физическим полям, оно подчиняется принципу суперпозиции, означающему, что действия двух или нескольких источников складываются.

При описании геохимических полей для обозначения переменных величин, численных показателей и любых других констант следует употреблять постоянные буквенные символы, перечень которых приведен в приложении.

1.6. ОБЪЕКТЫ ПОИСКОВ

Весь мировой опыт показывает, что самостоятельное промышленное значение имеют только крупные месторождения, на долю которых падает преобладающая часть учтенных запасов и добычи полезных ископаемых. Мелкие по масштабу запасов месторождения приобретают практическое значение только вблизи действующих горных предприятий и крупных разведанных месторождений того же сырья. Более того, открытие одного или нескольких мелких месторождений и отдельных рудных тел, нередко имея важное местное значение, не может существенно изменить сырьевой баланс даже в масштабе района. Выполнение заданий по опережающему добычу приросту промышленных запасов минерального сырья обеспечивает только своевременное открытие новых крупных месторождений. Поэтому для эффективного ведения геохимических поисков требуются учет соотношений между численностью месторождений различной крупности, четкая формулировка стратегической цели работ и оценка вероятности открытия месторождений заданного размера. Наилучшим образом эти задачи решаются при десятичной классификации месторождений по промышленным запасам, предложенной В. И. Красниковым, согласно которой их запасы для смежных классов крупности принимаются отличающимися на математический порядок.

Обозначая запасы месторождений в классе минимально-промышленных цифрой $n \cdot 10^m$ т, имеем для среднего по масштабу месторождения $n \cdot 10^{m+1}$ т, а для непромышленного рудопроявления — условные (забалансовые) запасы $n \cdot 10^{m-1}$ т. Запасы крупного месторождения составят $n \cdot 10^{m+2}$ т, а уникального месторождения $n \cdot 10^{m+3}$ т. Шкала является подвижной и в зависимости от сырьевой конъюнктуры, а также характера сырья можно придавать n значения от 1 до 9 и m — значения любых целых положительных или отрицательных чисел, что не влияет на характер вытекающих из нее выводов. Хорошее соответствие десятичной классификации существующим представлениям о месторождениях различной крупности подтверждают данные табл. 4, в которой приведены примерные цифры запасов, отвечающие рудным объектам трех классов.

По данным В. А. Перваго, месторождение меднопорфировых

Таблица 4

Десятичная классификация месторождений по масштабу запасов (по В. И. Красникову с изменениями)

Полезное ископаемое	Запасы, в т			n
	мелкие	средние	крупные	
Железные руды	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^9$	2—5
Бокситы, фосфориты	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^8$	2—5
Марганцевые и хромитовые руды, плавиковый шпат	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^7$	1—3
Медь, свинец + цинк, никель (сульф.), ниобий (Nb_2O_5)	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^6$	1—5
Молибден, вольфрам (WO_3), олово, сурьма	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^5$	1—3
Ртуть, бериллий (BeO), кобальт, серебро, уран, висмут	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^4$	1—3
Редкие и рассеянные элементы	$n \cdot 10^1$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^3$	1—9
Золото, платина	$n \cdot 10^0$	$n \cdot 10$	$n \cdot 10^2$	1—5

руд в среднем может считаться крупным при запасах 3 млн. т, для условий Крайнего Севера эта цифра повышается до 5 млн. т меди. Классы имеют «ширину» в пределах $1/3n — 3n$, где n — характеризует центр класса (точнее, $0{,}316n \div 3{,}16n$, поскольку $\sqrt{10} = 3{,}16$). Меднопорфировые месторождения с запасами более 9 млн. т меди в обычных условиях и более 15 млн. тонн в условиях Крайнего Севера допустимо считать уникальными. В мире известны только единичные месторождения, которые по своим запасам на порядок больше уникальных. Такие месторождения по предложению Е. М. Квятковского целесообразно называть феноменальными. К числу феноменальных относятся золоторудные месторождения Витватерсранда, платиновые месторождения Бушвельдского комплекса (ЮАР), бокситовые месторождения Австралии.

Численные соотношения между выявленными месторождениями разных классов крупности не отражают реальных соотношений, поскольку вероятности обнаружения месторождений различных размеров не одинаковы. Крупное месторождение, при прочих равных условиях, легче обнаружить, нежели однотипное мелкое. При одинаковом качестве руд крупное по размеру запасов месторождение будет характеризоваться более значительной протяженностью по простиранию и мощностью залежи. Выходам крупных месторождений в общем случае будут соответствовать большее число коренных обнажений полезного ископаемого, рудных свалов и более обширные зоны измененных пород. Более крупным месторождениям будут отвечать и более яркие, обширные по площади, многочисленные геохимические и геофизические аномалии. При поисках крупное месторождение будет встречено одним или даже несколькими маршрутами, по которым ведутся геологические, геохимические или геофизические съемки, а мелкое рудопроявление может целиком разместиться между маршрутами и выявлено не будет. Математически эта зависимость выражается вероятностью пересечения объекта поисков заданной сетью профилей с условием попадания в контур объекта не менее одной (двух) точек наблюдения. В случае непрерывных наблюдений вероятность П пересечения произвольно ориентированного линейного объекта длиной $2b$ сетью профилей с расстоянием между ними $2l$, при $b < l$, определяется решением задачи Бюффона (1777 г.):

$$П = \frac{2b}{\pi l}. \qquad (20)$$

Генетические однотипные месторождения и рудные тела различных классов крупности допустимо рассматривать в качестве геометрических и геохимических фигур подобия. Следовательно, при одинаковом качестве руд линейные размеры двух однотипных месторождений будут находиться в соотношениях:

$$L_1 : L_2 = \sqrt[3]{Q_1} : \sqrt[3]{Q_2}, \qquad (21)$$

а площадные размеры

$$S_1 : S_2 = \left(\sqrt[3]{Q_1}\right)^2 : \left(\sqrt[3]{Q_2}\right)^2, \qquad (22)$$

Десятичная классификация месторождений позволяет, безотносительно к их реальным размерам, определить соотношения между линейными и площадными размерами мелких, средних и крупных месторождений, согласно зависимостям:

$$L_{мелк} : L_{ср} : L_{кр} = \sqrt[3]{1} : \sqrt[3]{10} : \sqrt[3]{100} = 1 : 2{,}15 : 4{,}64; \qquad (23)$$

$$S_{мелк} : S_{ср} : S_{кр} = \left(\sqrt[3]{1}\right)^2 : \left(\sqrt[3]{10}\right)^2 \left(\sqrt[3]{100}\right)^2 = 1 : 4{,}64 : 21{,}5. \qquad (24)$$

На рис. 9 показаны сечения трех линзообразных тел, являющихся фигурами подобия, объемы которых, а следовательно и запасы в рядовых рудах, различаются в 10 и в 100 раз. Именно в пропорциях L и S будут находиться вероятности обнаружения при поисках месторождений различных классов крупности, хотя сами вероятности могут оставаться неизвестными. Эти зависимости будут сохраняться до тех пор, пока в данном районе не будут обнаружены все крупные, все средние и все мелкие месторождения, что отвечает условиям далекой перспективы. Поэтому число месторождений, зарегистрированное в кадастре, подлежит пересчету на основе соотношений между линейными и площадными размерами фигур подобия. Принимаем, что основным показателем при визуальных поисках, определявшим в прошлом открытие месторождений, была их длина (жилы, вытянутые линзы, пласты) и вероятность

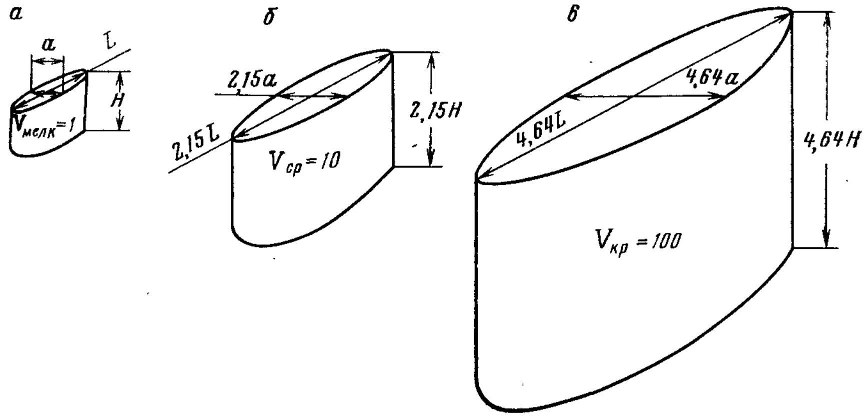


Рис. 9. Линейные и площадные размеры фигур подобия при соотношении объемов (*а* : *б* : *в*) 1 : 10 : 100

а — $S_{мелк}=1$; $V_{мелк}=1$; *б* — $S_{ср}=4{,}64$, $V_{ср}=10$; *в* — $S_{кр}=21{,}5$; $V_{кр}=100$

этого события подчинялась выражению (20). В результате пересчета, проведенного с учетом зависимости (23), обнаруживается приближенное убывание численности месторождений смежных классов крупности в сторону возрастающей крупности в пропорции 7 : 1. Это позволило, в частности, экстраполировать ожидаемую численность непромышленных рудопроявлений и следующих за ними рудных точек, не учитываемых кадастром. Применительно к методике геохимических поисков, как правило, ориентированной на выявление аномалий основного (ценного) рудного элемента, при соответствующих расчетах должны быть приняты во внимание дополнительные «запасы» металла, заключенные в первичном ореоле месторождения. В общем случае, возрастая по абсолютной величине для крупных месторождений, относительная доля металла в первичном ореоле уменьшается с увеличением общих запасов металла в объекте и, очевидно, возрастает до 100 % в непромышленных рудопроявлениях.

Все сказанное позволяет обобщить ожидаемые соотношения между характеристиками месторождений различных классов крупности на отвечающие им первичные и вторичные литохимические аномалии (табл. 5). Это, в свою очередь, дает возможность обосновать плотность поисковой сети, обеспечивающей с заранее выбранной вероятностью обнаружение объекта заданного размера в случае его нахождения в пределах изучаемого участка.

При поисках месторождений по их геохимическим аномалиям расчет прямоугольной сети геохимических съемок ведется по приближенным формулам А. М. Шурыгина:

$$П^{(1)}=1-e^{-S/\Delta S}; \qquad (25)$$

Таблица 5

Соотношения между рудными объектами различной крупности (41)

Показатель	Месторождения по классу крупности			Рудопроявления
	крупные	средние	мелкие	
По числу относительно крупных месторождений	1	7*	49	343
То же, %	0,25	1,75	12,25	85,75
По промышленным запасам в объекте относительно мелких месторождений	100	10	1	—
То же, в классе, %	46	32	22	—
По геохимическим «запасам» в объекте относительно мелких месторождений	49	7	1	0,143*
По площадным характеристикам первичных литохимических аномалий относительно мелких месторождений	13,4	3,66*	1	0,273*
То же, по линейным характеристикам	3,66	1,91*	1	0,523*

Примечание. Звездочками отмечены знаменатели прогрессий.

$$П^{(2)}=1-e^{-S/\Delta S}(1+S/\Delta S); \qquad (26)$$

$$П^{(i)}=1-e^{-S/\Delta S}\left[1+(S/\Delta S)+\frac{1}{2}(S/\Delta S)^2+\ldots+\frac{1}{(i-1)!}(S/\Delta S)^{(i-1)}\right], \qquad (27)$$

где $П^{(1)}$, $П^{(2)}$, $П^{(i)}$ — вероятности попадания в контур объекта не менее одной, не менее двух или не менее i точек прямоугольной сети наблюдений[1]; S — площадь объекта поисков, в данном случае — лито-, гидро-, атмо- или биогеохимической аномалии произвольной формы; ΔS — площадь ячейки поисковой сети.

По данным табл. 5 с учетом (25) можно рассчитывать ожидаемый результат поисковых литохимических съемок для неограниченной территории со «средней» рудностью. Пропорциональные зависимости (18) и (19) позволяют считать, что соотношения между площадными и линейными характеристиками месторождений различных классов крупности, приведенные в нижних строчках табл. 5, сохраняют свое значение для эффективных размеров вторичных остаточных ореолов рассеяния. Выбирая поисковую сеть из расчета обнаружения крупных

[1] Для расчета сетей при поисках месторождений по их потокам рассеяния формулы (25) — (27) не применимы (см. 2.4).

месторождений с вероятностью $П^{(1)}_{кр}=0{,}99$, что отвечает условию $\bar{S}_{кр}/\Delta S=4{,}61$, имеем $П^{(1)}_{ср}=0{,}715$ и $П^{(1)}_{мелк}=0{,}291$. Следовательно, в результате этих съемок, при условии их проведения на большой площади, можно ожидать выявления порядка 75 % от общих ресурсов металла, сосредоточенного в месторождениях, выходящих на уровень эрозионного среза.

Все сказанное об относительной численности месторождений различных классов крупности и об ожидаемых результатах поисковых работ относится к разряду общих закономерностей, от которых в каждом конкретном случае могут наблюдаться существенные отступления. Рассмотренные закономерности в первую очередь характеризуют рудные месторождения, выведенные на уровень современного эрозионного среза. Именно эти месторождения (рис. 10, *а*) для всех металлов, кроме железа, до сих пор играют основную роль в балансе их промышленных запасов. В рудных районах восточной и особенно северо-восточной части СССР, а также в развивающихся странах Азии, Африки и Латинской Америки резервы для поисков месторождений, выходящих на поверхность, еще весьма велики. По мере исчерпания фонда этих месторождений, сравнительно легко открываемых геохимическими методами, неизбежен постепенный переход к поискам месторождений в более сложных условиях залегания, например, слепых, но выходящих на поверхность своими надрудными первичными ореолами (см. рис. 10, *а*). Для части «старых» рудных районов СССР и для большинства индустриально развитых стран Западной Европы и США этот период уже наступил. Поэтому объектами геохимических поисков, помимо месторождений в условиях «открытого» залегания, являются также погребенные месторождения, ранее выходившие на уровень древнего эрозионного среза, а затем перекрытые чехлом молодых осадков ограниченной мощности (см. рис. 10, *б*). Важнейшим резервом служат слепые рудные тела, а также эндогенные и экзогенные месторождения в условиях слепого залегания первичных ореолов основного рудного элемента (см. рис. 10, *в*). Первичные ореолы элементов-спутников, вторичные солевые, газовые и биогеохимические ореолы рассеяния этих месторождений могут достигать дневной поверхности, позволяя их обнаруживать специальными геохимическими методами. Более отдаленным резервом, по-видимому, являются слепые погребенные месторождения (см. рис. 10, *г*). Заведомо допуская разнообразие условий нахождения промышленных месторождений, методика поисковых геохимических съемок предусматривает индивидуальный подход к оценке каждой выявленной аномалии, общее число которых нередко составляет многие сотни. В зависимости от генетического типа месторождений и характера сырья форма и конкретные размеры месторождений одинаковых классов крупности, естественно, будут различаться. Однако в силу общности экономического понятия о полезных ископаемых стоимость извлечения из недр 1 м³ руды, при прочих равных условиях, не зависит от того, содержится ли в ней 65 % Fe, 0,8 % Cu или $4\cdot10^{-4}$ % Au. Это сближает требования промышленности к запасам горной массы в месторождениях разных металлов, особенно в классе крупных объектов, допускающих наиболее выгодную открытую разработку, что иллюстрируют данные сопоставления четырех различных месторождений (табл. 6). Цифры их промышленных запасов различаются в 1,3 млн. раз, содержание полезного компонента в рудах изменяется в 50 000 раз (P_2O_5 : Au), однако по объему горной массы они различаются сравнительно мало. Еще меньше сказываются эти

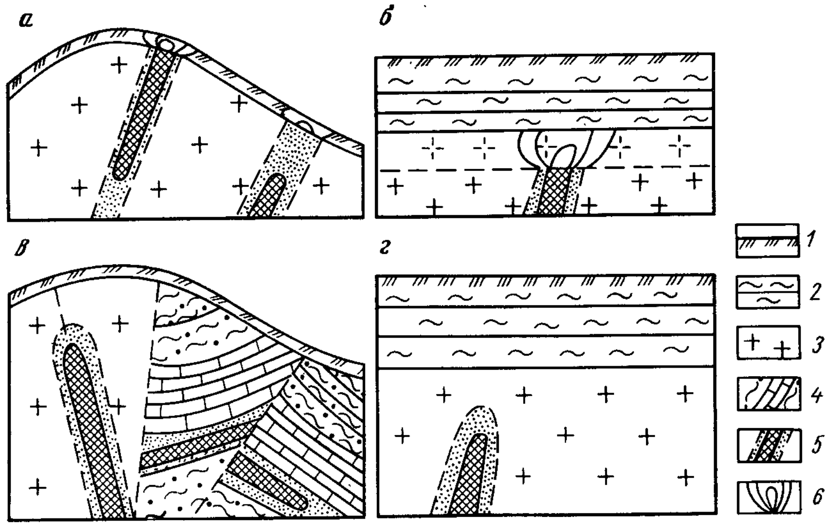


Рис. 10. Рудные месторождения в различных условиях залегания

а — выходящие на поверхность; *б* — погребенные; *в* — слепые; *г* — слепые погребенные. *1* — современный элювио-делювий; *2* — дальнеприносные отложения; *3, 4* — рудовмещающие породы; *5* — рудные тела и их первичные ореолы (по основному рудному элементу); *6* — вторичные остаточные ореолы рассеяния

Таблица 6

Сравнительные характеристики крупных месторождений

Полезное ископаемое	Запасы, тыс. т	Содержание полезного компонента, %	Плотность, т/м³	Объем горной массы, млн. м³	Соотношения линейных размеров для фигур подобия
Медь	$3\cdot10^{6}$	0,8	2,65	141	1,22
Молибден	$3\cdot10^{2}$	0,15	2,60	77	1,0
Фосфоритовые руды (P_2O_5)	$4\cdot10^{8}$	20	2,90	138	1,21
Золото	$3\cdot10^{-1}$	$4\cdot10^{-4}$	2,60	29	0,72

различия на линейных размерах геометрических фигур подобия. На стадиях поисковых работ это позволяет генерализовать понятие о рудных месторождениях и ориентироваться на эмпирические данные о средних эффективных размерах литохимических аномалий, отвечающих крупным месторождениям разных полезных ископаемых. Количественные характеристики крупного месторождения полезного ископаемого имеют временный геолого-экономический смысл и не могут рассматриваться в качестве природных параметров. Требования промышленности к запасам минерального сырья в объектах, относимых к разряду крупных, постоянно растут при одновременном снижении кондиций на добываемое сырье. Так, например, средние содержания меди в добываемых рудах за последние 100 лет уменьшились почти в 10 раз.

Несмотря на изменчивость цифр запасов в месторождениях, именуемых в данный период «крупными», и средних содержаний полезных компонентов в рудах, относимых к разряду «богатых» или «рядовых», специальные исследования подтверждают зависимость этих величин для разных химических элементов от закономерностей их распределения в земной коре. Наиболее полно эти вопросы исследовал Е. М. Квятковский, установивший серию зависимостей между глобальными запасами, размерами месторождений, содержаниями металлов в рудах и кларками химических элементов [22]. Убедительным доказательством зависимости геолого-экономических требований от природных геохимических закономерностей является тесная корреляция между запасами полезных ископаемых в месторождениях одного класса крупности и кларками элементов литосферы (табл. 7), характеризуемая коэффициентом ранговой корреляции $r_{xy}=0{,}873$ при $r_{5\%}=0{,}468$. Анализируя эти связи, Е. М. Квятковский пришел к выводу, что запасы металлов в месторождениях трех десятичных классов крупности приближенно подчиняются эмпирической зависимости $Q_{мелк}=10^6\ C_к$, $Q_{ср}=10^7\ C_к$ и $Q_{кр}=10^8\ C_к$. Судя по уточненным данным табл. 7, более близким соотношениям (кроме кобальта) отвечало бы повышение этих цифр на один порядок. С учетом изменяющихся промышленных требований анализ подобных зависимостей требует большой осторожности.

Таблица 7

Промышленные запасы крупных месторождений и кларки литосферы (42)

Химический элемент	Запасы $Q_{кр}$, т	$C_к$, %	Химический элемент	Запасы $Q_{кр}$, т	$C_к$, %
Fe	$5\cdot10^9$ (руда)	4,65	Sb	$3\cdot10^5$	$5\cdot10^{-5}$
P	$4\cdot10^8$ (20 % P_2O_5)	0,093	W	$3\cdot10^5$ (WO_3)	$1{,}3\cdot10^{-4}$
F	$2\cdot10^7$ (40 % CaF_2)	0,066	Sn	$2\cdot10^5$	$2{,}5\cdot10^{-4}$
Cu	$3\cdot10^6$	$4{,}7\cdot10^{-3}$	Co	$3\cdot10^4$	$1{,}8\cdot10^{-3}$
Zn	$2\cdot10^6$	$8{,}3\cdot10^{-3}$	Be	$3\cdot10^4$ (BeO)	$3{,}8\cdot10^{-4}$
Pb	$2\cdot10^6$	$1{,}6\cdot10^{-3}$	Bi	$2\cdot10^4$	$2\cdot10^{-5}$
Ni	$1\cdot10^6$	$5{,}8\cdot10^{-3}$	Hg	$2\cdot10^4$	$8{,}3\cdot10^{-6}$
Nb	$1\cdot10^6$	$2\cdot10^{-3}$	Ag	$1\cdot10^4$	$7\cdot10^{-6}$
Mo	$3\cdot10^5$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	Au	300	$4{,}3\cdot10^{-7}$

1.7. ВЗАИМОСВЯЗАННОСТЬ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ В ГЕОСФЕРАХ

Залегающее в толще горных пород промышленное или самое незначительное тело полезного ископаемого любого минерального сырья, само по себе являясь геохимической аномалией, способно в соответствующих условиях образовать литохимические, гидрохимические, биогеохимические и атмохимические ореолы и потоки рассеяния. В процессе гипергенной миграции элементов в любой из геосфер возможно появление различных вторичных аккумуляций химических элементов. Все эти геохимические аномалии вследствие непрерывного обмена между геосферами тесно связаны между собой.

В настоящее время следует считать доказанным неизменное появление гидрохимических аномалий в составе речных или подземных вод вблизи рудных месторождений самых различных генетических типов. В равной мере, не вызывает сомнений реальность возникновения аномальных содержаний рудных элементов в составе растительности, произрастающей в зоне оруденения, поскольку среда обитания определяет состав живого вещества. Соответствующими исследованиями многих авторов в нашей стране и за рубежом доказано наличие аномальных концентраций газообразных компонентов оруденения в приземной и подземной атмосфере рудных месторождений.

Взаимосвязанность и взаимообусловленность рудных геохимических аномалий в литосфере, атмосфере, гидросфере и биосфере, а также характер возникающих при этом прямых и обратных связей иллюстрирует схематический рис. 11. Рудные тела и их первичные ореолы, залегая в литосфере, способны к прямому образованию вторичных ореолов рассеяния в элювио-делювиальных продуктах выветривания и перекрывающих породах, а также потоков рассеяния в аллювиальных отложениях гидросети. Эти геохимические аномалии являются соответственно первым и вторым удалениями от объекта поисков — рудного месторождения в литосфере. За счет эффузии и диффузии газов по рудным зонам из глубины формируются газовые ореолы и потоки рассеяния в подземной и приземной атмосфере. С учетом участия в этих процессах рудных минералов литохимических ореолов рассеяния, газовые аномалии следует считать соответственно вторым и третьим удалениями от объекта поисков. Газообразные компоненты атмохимических ореолов,

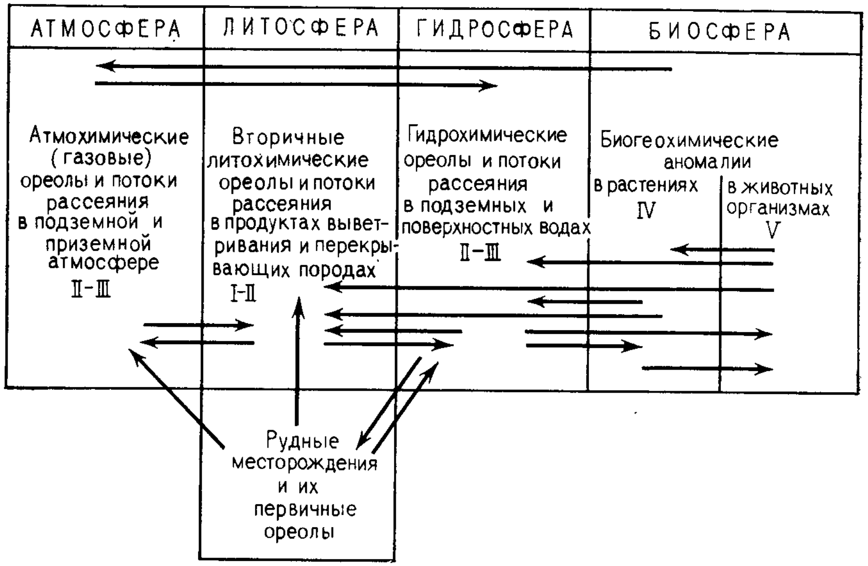


Рис. 11. Взаимосвязанность и взаимообусловленность геохимических аномалий в геосферах.

I—V — степень удаления от объекта поисков. Стрелками показаны направления прямых и обратных связей

участвуя в химических реакциях зоны окисления, подвергаясь сорбции и окклюзии, переходят в твердую фазу, что отражает их обратную активную связь с литохимическим ореолом рассеяния.

Аналогичным вторым и третьим удалениям от объекта поисков являются геохимические аномалии в гидросфере, возникающие в результате растворения рудных минералов при взаимодействии подземных вод с коренным оруденением, атмосферных осадков с вторичными литохимическими ореолами и речных вод с литохимическими потоками рассеяния. Эти гидрохимические ореолы и потоки рассеяния на всем пути своего существования оказывают обратное активное воздействие на первичное оруденение (образуя, например, зону вторичного сульфидного обогащения) и на литохимические ореолы и потоки рассеяния путем обменных химических реакций, соосаждения, сорбции или испарения. При этих взаимодействиях природных вод с горными породами равновесие в распределении рудных элементов в общем случае оказывается сдвинутым в пользу твердой фазы. Произрастающая в зоне оруденения растительность, неспособная к непосредственному восприятию твердой минеральной пищи, аккумулирует повышенные содержания рудных элементов из водных ореолов и потоков рассеяния, определяя появление местных биогеохимических аномалий. Это поглощение рудных элементов растениями не является безвозвратным. Доказана способность растительности в процессе респирации влаги испарять

в атмосферу легколетучие металлоорганические соединения, образуя биогенную составляющую атмохимических аномалий над рудными месторождениями. С выпадающими атмосферными осадками эти газовые компоненты возвращаются в литосферу и гидросферу.

Ежегодно в результате естественного растительного опада и последующей его минерализации рудные элементы возвращаются в гидросферу в форме растворимых соединений или в литосферу в виде твердых минеральных остатков. Цепь этих последовательных связей продолжается в сторону животных организмов.

По мере перехода от литохимических съемок к гидрохимическим и от гидрохимических к биогеохимическим (см. рис. 11) связи между рудным месторождением (целью геохимических поисков) и выявляемыми аномалиями становятся все более сложными и отдаленными, а результаты съемок — трудно интерпретируемыми. Уже при «флорометрических» съемках различия между биогеохимическими ореолами и потоками рассеяния в значительной мере стираются, а обнаруженные аномальные содержания рудных элементов в животных организмах вообще не поддаются такой привязке к местности, которая позволяла бы приступить к их разведке горными работами и бурением. В отличие от биогеохимических и гидрохимических аномалий, вторичные литохимические ореолы и потоки рассеяния и первичные ореолы месторождений связаны с рудными телами отчетливыми прямыми связями. Выявленные литохимические аномалии допускают оценку масштаба ожидаемого оруденения и, с учетом других данных, служат непосредственным основанием для заложения поисково-разведочных выработок и скважин.

С целью разработки «зоометрического метода разведки» в рудных районах Урала было исследовано 3200 особей — млекопитающих, птиц и амфибий. Автор этих исследований, объясняя обнаруженные им «зоометрические» связи с оруденением, с полным основанием писал, что амфибии питаются насекомыми, насекомые — растениями, а растения произрастают на почвах, которые обогащаются металлами из залегающих на глубине рудных месторождений. Поскольку для поступления в биосферу рудные минералы должны пройти стадию растворения, «зоометрические» аномалии являются **пятым** (см. рис. 11) удалением от рудного месторождения. Бессмысленность биогеохимических поисков путем исследования животных организмов вполне очевидна.

Рудные месторождения могут сопровождаться одновременно лито-, гидро-, атмо- и биогеохимическими аномалиями. Однако из соображений целесообразности геохимические поиски должны проводиться только одним, в редких случаях двумя методами. Накопленный опыт показывает, что в широком диапазоне геологических условий преимущества для поисков рудных месторождений имеют литохимические исследования. Это положение,

по-видимому, сохранится до тех пор, пока промышленная добыча металлов будет ориентирована на их извлечение из литосферы. С ростом требований к глубинности поисков и прогрессом в методике атмохимических съемок следует предвидеть увеличение их роли, поскольку именно в газовой фазе миграция химических элементов протекает наиболее активно. В горных районах, где поиски рудных месторождений успешно проводятся литохимическим методом, проводить гидро-, атмо- и биогеохимические поиски, как правило, можно, но не нужно. В других случаях предпочтение должно быть отдано тому из геохимических методов (реже их сочетанию), применение которого способно обеспечить наибольшую геолого-экономическую эффективность поисков.

При сопоставлении геолого-поисковых возможностей различных геохимических методов рассмотрению подлежат эффективные размеры аномалий в контуре $C_{\phi\varepsilon}^3$ и показатель контрастности (10) для слабых геохимических аномалий, если их обнаружение допустимо связывать с открытием промышленных месторождений.

1.8. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЛАНДШАФТЫ

Геохимические поиски слепых и погребенных месторождений любого генезиса могут проводиться на значительной глубине от дневной поверхности, относимой с точки зрения современных процессов к зоне сравнительного геохимического покоя (см. рис. 10, *б, г*). Значительно чаще геохимические поиски месторождений ведутся на земной поверхности, в области сочленения литосферы с атмосферой и гидросферой, в условиях активной современной механической, солевой и биогенной миграции химических элементов. В итоге методика этих геохимических поисков и оценка выявленных лито-, гидро-, атмо-, и биогеохимических аномалий в большой мере определяются закономерностями гипергенной миграции элементов. Анализу этих процессов посвящено созданное Б. Б. Полыновым учение о геохимических ландшафтах [29]. В основе его лежат представления об элементарных ландшафтах — участках земной поверхности, характеризуемых единообразием условий гипергенной миграции химических элементов, с однородными климатическими и геологическими условиями, с определенным типом рельефа, растительности и почвы. Соответственно этому выделяются автономные (элювиальные) ландшафты плоских водоразделов с глубоким залеганием водоносного горизонта, трансэлювиальные (элювио-делювиальные) ландшафты горных склонов и супераквальные (надводные) элементарные ландшафты, характеризуемые близким к поверхности залеганием грунтовых вод. Парагенетическая ассоциация элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов, образует местный геохимический ландшафт. Важнейшими внешними факторами гипергенной миграции химических

элементов являются характер рельефа, абсолютный уровень и колебания температуры, испарение воды и выпадение атмосферных осадков, физическая дезинтеграция и денудация горных пород, процессы растворения и осаждения, гидролиз, реакции окисления и восстановления, процессы развития и отмирания растительных и животных организмов. Различные соотношения этих факторов находят наиболее полное отражение в существовании на поверхности земли климатических и растительных поясов, закономерно сменяющихся с широтой и абсолютной высотой местности. Соответственно этому классификация геохимических ландшафтов построена на биоклиматической основе.

А. И. Перельман выделяет 4 группы геохимических ландшафтов, в соответствии с особенностями биологического круговорота воздушных мигрантов (C, O, H, N): 1) лесные; 2) луговые и степные; 3) тундровые; 4) примитивно-пустынные. В каждой из этих групп, в зависимости от вида растительных сообществ, объема ежегодно продуцируемой биомассы, ее состава и скорости разложения растительного опада, выделяются различные типы ландшафтов.

Деление геохимических ландшафтов на классы определяется составом типоморфных элементов и ионов водной миграции (Ca, Mg, Na, Cl, S, HCO_3 и т. д.). Ландшафтно-геохимическое районирование территорий по характеру растительного покрова (группы, типы и семейства) с позиций методики геохимических поисков достаточно удобно. Этот признак отчетливо фиксирует условия проведения поисков, которые различны в залесенных или степных районах, в тундре или пустыне. Одновременно биоклиматическая характеристика предопределяет строение ландшафта, под которым понимается роль и мощность слагающих его ярусов — горизонтов: наземной растительности, современной коры выветривания, развитой по ней почвы и грунтовых вод. Наглядные примеры различного строения отдельных типов элементарных ландшафтов приведены на рис. 12. Важное значение для методики геохимических поисков имеет классификация ландшафтов по составу макрокомпонентов минерализации природных вод [29].

По величине pH природные воды ландшафта разделяются на 4 класса: 1) сильнокислые с $pH<3$; 2) кислые и слабокислые с pH от 3,5 до 6,5; 3) нейтральные и слабощелочные с pH от 6,5 до 8,5; 4) сильнощелочные с $pH>8,5$. В природных условиях зоны гипергенеза преобладающее значение имеют слабые кислоты (CO_2, органические кислоты) и сильные основания (Na, K, Ca, Mg). Поэтому наибольшее распространение имеют ландшафты, характеризуемые слабокислой реакцией среды (лесные и тундровые на равнинах), нейтральной реакцией (горно-лесные и горно-тундровые), нейтральной и щелочной реакцией (степные и пустынные). Сильнокислые воды обнаруживаются только в локальных участках, например, в зоне окисления сульфидных месторождений (H_2SO_4) или в связи с вулканической деятель-

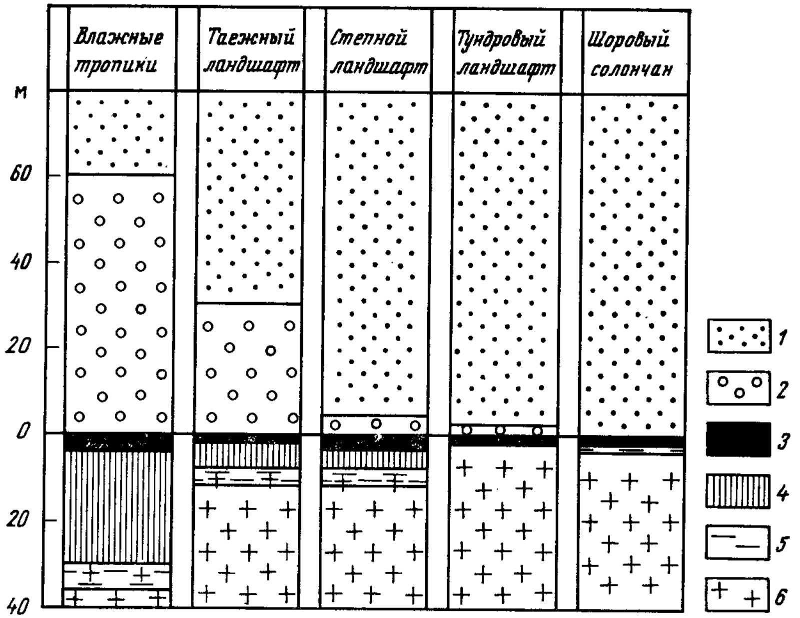


Рис. 12. Строение элементарных ландшафтов.

1 — надземная атмосфера; *2* — растительный покров и животный мир; *3* — почва; *4* — кора выветривания; *5* — горизонт грунтовых вод; *6* — коренные породы

ностью (HCl), сильнощелочные почвы связанные обычно с содовым засолением (Na_2CO_3; $NaHCO_3$).

Окислительно-восстановительные условия на поверхности земли определяются господством кислородной обстановки, обязанной свободному кислороду атмосферы, его растворению в водах ландшафта и фотосинтезу растений. Чаще всего граница «кислородной поверхности», ниже которой среда уже не содержит свободного кислорода, совпадает с зеркалом грунтовых вод. Восстановительная обстановка возникает в условиях обилия разлагающихся органических остатков, главным образом растительного опада, и под действием микроорганизмов. Различают восстановительную обстановку без сероводорода (глеевую), характерную для болот, и восстановительную обстановку с H_2S, имеющую локальное распространение. Показателем смены окислительно-восстановительных условий является окраска пород: красные и бурые тона, обязанные соединениям Fe^{3+}, характеризуют окислительную обстановку, серо-зеленые и сизые тона, свойственные соединениям Fe^{2+}, отвечают восстановительным условиям. В щелочных условиях и при высокой температуре реакции окисления протекают легче, чем в кислой среде и при низкой температуре. Это, в частности, определяет господство окислительных условий в пустынях и восстановительных условий в ландшафтах тундр. В кислых водах тайги границе между

окислительной и восстановительной обстановками отвечают значения Eh = +0,40, в щелочных водах степей величина «пограничного» значения снижается, например, до Eh = +0,15.

Абсолютные содержания химических элементов в водах не могут характеризовать способность перехода элементов в раствор по причине их различного содержания в литосфере. Таким показателем служит предложенный А. И. Перельманом коэффициент водной миграции элементов:

$$K_x = \frac{m_x 100}{aC_x}, \qquad (28)$$

где m_x — содержание элемента в воде, г/л; a — общая минерализация воды, г/л; C_x — содержание этого элемента в горных породах, с которыми данная вода находится в контакте, %.

Для сравнительной характеристики интенсивности водной миграции химических элементов служат также их коэффициенты талассофильности («морелюбивости») — отношение кларка данного элемента в гидросфере к его кларку в литосфере. Показатель талассофильности τ_x, являясь важной расчетной величиной, зависит не только от сравнительной интенсивности перехода элемента в раствор, но и от последующих физико-химических и биогенных процессов его вывода из океанической воды, состав которой определяет кларки гидросферы. Коэффициенты водной миграции элементов определяются экспериментально и характеризуют их поведение в конкретной ландшафтно-геохимической обстановке. С этой стороны значения K_x наиболее близко характеризуют роль водной миграции рудных элементов при формировании гипергенных геохимических аномалий.

По интенсивности водной миграции выделяется группа активных водных мигрантов ($K_x = n \cdot 10 \div n \cdot 100$) и группа инертных элементов ($K_x \leqslant 0{,}0n$), поведение которых практически не зависит от кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий среды. Самостоятельную группу образуют элементы с контрастной миграционной способностью в водной среде, для которых значения $K_x \gtrless 1$ определяются геохимической характеристикой среды, в первую очередь значениями pH и Eh. Представителями этой группы элементов с переменной валентностью являются, например, уран и молибден, способные к энергичной водной миграции в окислительной среде в шестивалентной форме и оказывающиеся инертными в восстановительной обстановке в четырехвалентной форме. В отличие от них, в «глеевой» восстановительной обстановке (без сероводорода) активно мигрируют в растворе в двухвалентной форме Fe^{2+} и Mn^{2+}. Эти же элементы в окислительных условиях в форме Fe^{3+} и Mn^{4+} практически неспособны к водной миграции. Значения коэффициентов водной миграции и талассофильности для важнейших рудных и некоторых других химических элементов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Коэффициенты водной миграции K_x и талассофильности τ_x некоторых элементов [28, 29]

Активные водные мигранты		Слабо подвижные и инертные мигранты	Элементы с контрастной миграционной способностью $K_x \geq 1$	
			Подвижные и слабо подвижные в окислительной среде и инертные в восстановительной	Подвижные и слабо подвижные в восстановительной среде (без сероводорода) и инертные в окислительной
$K_x = n \cdot 10 - n \cdot 100$	$K_x = n$	$K_x = 0{,}1$—$0{,}01$ и менее		
Cl (111), S (1,9) Br (30), B (0,4), I(0,125)	F (0,0015) Sr (0,023)	Ba ($3 \cdot 10^{-5}$), Rb, Li, P ($5 \cdot 10^{-5}$), Sn ($1{,}2 \cdot 10^{-3}$), Sb, As ($8 \cdot 10^{-3}$), Al, Ti, Zr, Cr, TR, Nb, Ta, W, Bi, Au ($9 \cdot 10^{-4}$), Pt, Th ($3 \cdot 10^{-5}$)	Мигрируют только в кислых водах: Zn ($6 \cdot 10^{-4}$), Cu ($4 \cdot 10^{-4}$) Ni ($5 \cdot 10^{-5}$), Pb ($3 \cdot 10^{-4}$), Cd, Hg ($3 \cdot 10^{-4}$), Ag. Мигрируют в кислых и в щелочных водах: V ($5 \cdot 10^{-6}$), U ($8 \cdot 10^{-4}$), Mo ($9 \cdot 10^{-4}$), Se ($8 \cdot 10^{-2}$)	Fe ($1 \cdot 10^{-6}$), Mn ($4 \cdot 10^{-6}$), Co ($5 \cdot 10^{-5}$)

Примечание. В скобках — значения τ_x.

Из данных табл. 8 видно, что водная миграция в качестве основной формы передвижения элементов в зоне гипергенеза со значениями $K_x > 10$ и $\tau_x > 1$ свойственна Cl, S и Br. Для бора, типичного водного мигранта, коэффициент талассофильности падает до 0,4, а для йода, в связи с его биофильностью, — даже до $\tau_x = 0{,}125$. Еще меньшими значениями коэффициента талассофильности характеризуются F и Sr, сравнительно активные водные мигранты. Все рудные элементы, без каких-либо исключений, характеризуются весьма малыми значениями коэффициентов талассофильности и кларки их в литосфере в тысячи и сотни тысяч раз выше кларков в гидросфере. Учитывая, что многие рудные элементы характеризуются устойчиво малыми значениями коэффициентов водной миграции, что природным водам горных районов свойственна преимущественно нейтральная или слабо-щелочная реакции (инертны Zn, Cu, Ni, Pb ...), что разлагающиеся растительные остатки создают восстановительную обстановку (инертны Mo, U ...) и что на поверхности земли господствует кислородная обстановка (инертны Fe, Mn, Co), резко подчиненная роль водной миграции рудных элементов становится вполне очевидной. Это не значит, что рудные или породообразующие элементы, характеризуемые значениями $K_x \ll 1{,}0$, не способны к миграции в зоне гипергенеза. В масштабах, многократно превышающих водную миграцию, эти элементы в форме разнообразных природных минеральных и безминеральных образований мигрируют в твердом состоянии, вследствие механической водной и ветровой денудации суши. В различной мере эти процессы дополняются биогенной и газовой миграцией элементов. Все это, независимо от величин коэффициентов водной миграции, сообщает элементам универсальную геохимическую подвижность в любых ландшафтах. Преобладание механических форм миграции элементов в ландшафтах рудных районов характеризуют отношения между модулями твердого и растворимого стока с суши в среднем как 10 : 1 (см. 2.1), что нивелирует влияние различий в коэффициентах водной миграции элементов. В условиях сглаженного рельефа роль механогенеза ослабляется и влияние особенностей водной миграции элементов и гумидности или аридности климата на формирование ландшафта возрастает. В целом малые значения K_x и τ_x для рудных элементов и преобладающая их гипергенная миграция в твердой фазе лишний раз подтверждают преимущественное значение для поисков рудных месторождений литохимического метода.

Элементы, находясь в растворе, в изменившейся геохимической обстановке способны выпасть в осадок, образуя вторичные аккумуляции. Участки, на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции элементов, сопровождаемое их концентрированием, именуются геохимическими барьерами [28]. На физико-химических барьерах осаждаются элементы с контрастной миграционной способностью. Активные водные мигранты выпадают в осадок при испарении раствора, а элементы с устойчиво малыми коэффициентами водной миграции способны к вторичной аккумуляции в результате гравитационной классификации минералов по плотности при переносе в твердом состоянии и образовании механических осадков. Соответственно этому различают следующие главнейшие типы гипергенных геохимических барьеров:

1) испарительный (B, Sr, F, иногда Mo);
2) гравитационный (Au, Pt, Sn, W, Nb, Ta, Ti и др.);
3) восстановительный (Mo, U, Se);
4) кислородный (Fe, Mn);
5) щелочной (Cu);
6) адсорбционный (Cu, Zn, Pb, U, Mo и др.).

Перечень возможных геохимических барьеров этим не исчерпывается, здесь перечислены только важнейшие из них и указаны те химические элементы, гипергенные аккумуляции которых обнаруживаются при геохимических поисках. Возможность взаимосвязанного появления лито-, гидро- и биогеохимических аномалий подразумевается на любых геохимических барьерах. В отдельных случаях накопление рудного элемента на гипергенном геохимическом барьере приобретает масштаб, достаточный для образования промышленных экзогенных месторождений данного элемента в литосфере в форме первично-осадочных руд и россыпей или в гидросфере в форме концентрированных рассолов (Br, I). Понятие об осаждении элементов на геохимических барьерах применимо и к процессам эндогенной миграции, характеризуя, например, гидротермальное рудоотложение. Вторичные аккумуляции рудных элементов на гипергенных геохимических барьерах могут иметь характер безрудных аномалий, подлежащих отбраковке при геохимических поисках. Диагностическим признаком, отличающим вторичные ореолы и потоки рассеяния рудных месторождений от безрудных аккумуляций, является совместное появление в рудных аномалиях высоких содержаний таких элементов, соосаждение которых не характерно для гипергенных геохимических барьеров (Sr и Pb; Sn и Mo; Au и As и т. п.).

Анализ ландшафтных условий приобретает первостепенное значение при наземных литохимических съемках в закрытых рудных районах, когда возможные рудные аномалии над погребенными месторождениями соизмеримы по амплитуде и трудно отличимы от безрудных испарительных, сорбционных и биогенных аккумуляций микроэлементов.

Мелкомасштабное ландшафтно-геохимическое районирование территорий весьма важно для обоснования методики геохимических поисков рудных месторождений (см. гл. 6). В задачу его, в частности, входит выделение районов, в которых производство наземных литохимических съемок является неэффективным, в которых они должны дополняться или заменяется гидро-, атмо- или биогеохимическими съемками или выполняться в варианте глубинных литохимических поисков. В горных районах, в самых различных ландшафтах, от сухих степей Средней Азии до тундр Чукотки, вторичные литохимические ореолы и потоки рассеяния рудных месторождений отчетливо проявлены на современной дневной поверхности. Количественным выражением суммы ландшафтно-геохимических условий, характеризующим поведение того или иного рудного элемента, являются местные величины

коэффициента продуктивности $k \gtrsim 1$, входящего в выражения (18)—(19) или им подобные. Местные значения этих коэффициентов существенно дополняют описания ландшафтов.

1.9. МЕТОДИКА ПОИСКОВ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Основным принципом методики геохимических поисков месторождений полезных ископаемых является их подчинение установленным стадиям геологоразведочного процесса, начиная от региональных государственных съемок до стадии эксплуатационной разведки месторождений. Соответственно этому геохимические съемки выполняются первоначально в мелких масштабах на обширных территориях, а затем выборочно, на основе полученных результатов, в последовательно укрупняющихся масштабах на уменьшающихся площадях. Переход от мелкомасштабных к детальным геохимическим съемкам не означает простого повторения поисков с увеличенной плотностью наблюдений, при этом изменяются методика и задачи работ.

1. Мелкомасштабные поиски ориентируются на универсальные признаки, свойственные большинству месторождений, например, на большие размеры геохимических аномалий, отвечающих крупным месторождениям. При детальных работах учитываются индивидуальные, часто неповторимые особенности каждого конкретного месторождения.

2. При мелкомасштабных геохимических съемках опробованию в поисковых целях подвергаются отложения, более **отдаленные** от объекта поисков, например озерные или речные отложения, природные воды или растительность. По мере укрупнения масштаба поисковых съемок генетическая принадлежность опробуемых отложений сближается с объектом поисков, на заключительных стадиях опробуются коренные породы и руды. Геологическое изучение территорий ведется последовательно в масштабах 1 : 1 000 000, 1 : 200 000 и 1 : 50 000, промежуточные масштабы — 1 : 500 000, 1 : 100 000 и 1 : 25 000 — применяются редко. Съемки масштаба 1 : 10 000 и крупнее, считающиеся отраслевыми, выполняются только в связи с разведкой месторождений или для нужд строительства. В этих же основных масштабах ведутся поисковые и детальные геохимические съемки, опережая или сопровождая геологическое картирование. Из 22,4 млн. км^2 территории СССР примерно 7,0 млн. км^2 относятся к горно-складчатым районам, в которых возможно эффективное проведение различных наземных и воздушных геохимических съемок с целью поисков рудных месторождений, выходящих на поверхность (см. рис. 10, *а*). Еще 3 млн. км^2 территории с чехлом молодых осадков до 500 м допускают проведение наземных и глубинных геохимических поисков погребенных рудных месторождений (см. рис. 10, *б*). Геологические исследования на остальной территории, с мощной толщей платформенных отложений, связаны в первую очередь с поисками месторожде-

ний нефти и газа, угля, стройматериалов, месторождений гидрохимических осадков и россыпей.

Геологическое картирование территории СССР в масштабе 1 : 1 000 000 закончено и поисковые геохимические съемки в нашей стране в этом масштабе не ведутся. Каждая из стадий геологоразведочного процесса и соответствующие им по детальности поисковые геохимические съемки подчиняются решению определенных задач, изменяющихся в зависимости от экономической освоенности и геологической изученности территорий. Во вновь осваиваемых районах целью поисковых работ является обнаружение только крупных и очень крупных месторождений с относительно легко доказуемыми запасами руд (не слепых).

Возникает естественный вопрос, сколько крупных месторождений можно ожидать в рудном районе? Ответом на это могут быть только некоторые средние цифры, в связи с различной рудонасыщенностью территорий, и приближенные оценки, в силу неполноты наших сведений о действительных ресурсах даже детально исследованных районов. Ориентировочно можно считать, что на 10 тыс. км^2 площади относительно хорошо изученных рудных районов в среднем приходится одно крупное месторождение. Исходя из этого и соотношений между численностью месторождений различных классов крупности (см. табл. 5), по-видимому, следует оценивать число ожидаемых открытий на неизученных рудоперспективных территориях, если их размеры достаточны для соблюдения закона больших чисел. Это будут месторождения тех полезных ископаемых и тех генетических типов, нахождения которых на данной территории можно ожидать с учетом ее геологического строения, истории геологического развития и металлогенических особенностей. Эти и другие данные находят отражение на геологических картах масштаба 1 : 1 000 000 или ближайшего более мелкого масштаба. Эффективное ведение поисковых работ обеспечивается планомерным выполнением геохимических съемок масштаба 1 : 200 000 на больших площадях ($n\cdot10^4$—$n\cdot10^5$ км^2), без каких-либо пропусков и произвольных изъятий. Последнее определяется геологическим правилом: «нет бесперспективных территорий, есть территории изученные и неизученные».

Следующую стадию составляют геохимические съемки масштаба 1 : 50 000 и в смежных масштабах (1 : 100 000—1 : 25 000). Это могут быть воздушные, наземные или глубинные лито-, гидро-, атмо- или биогеохимические съемки, выполняемые с учетом условий, рассмотренных в разделе 1.7. Обычно эти съемки ориентируются на выявление вторичных ореолов рассеяния месторождений. Если они проводятся после геохимических съемок масштаба 1 : 200 000, им придается преимущественно оценочный характер. В горнопромышленных районах геохимические съемки масштаба 1 : 50 000 по вторичным ореолам рассеяния могут проводиться, минуя съемки масштаба 1 : 200 000. В последнем случае стратегической целью этих работ, помимо выявления новых крупных месторождений, могут стать поиски средних и мелких месторождений. Геохимические съемки масштаба 1 : 50 000 выполняются в порядке очередности, определяемой суммой геолого-экономических соображений.

С учетом полученных данных переходят к поисково-оценочным работам масштаба 1 : 10 000, которые, как правило, выполняются литохимическими методами. По картам вторичных литохимических ореолов рассеяния и первичных ореолов рудных элементов обеспечивается наилучшее размещение разведочных канав и первых скважин с целью вскрытия и опробования полезного ископаемого в коренном залегании.

Если выработки вскрывают промышленное оруденение, геологическая задача считается решенной положительно. Дальнейшее применение геохимических методов определяется ходом разведочных работ и геологическими особенностями выявленного месторождения. Если выработки встречают только непромышленную минерализацию, детальность литохимического опробования коренных рудовмещающих пород по горным выработкам и скважинам может доводиться до масштаба 1 : 1000—1 : 200. Интерпретация этих данных ведется на основе теории формирования первичных ореолов рудных месторождений и зонального рудоотложения (см. гл. 4). С такой же детальностью и на тех же принципах ведутся литохимические поиски слепых рудных тел на флангах и глубоких горизонтах промышленных месторождений на стадиях их предварительной, детальной и эксплуатационной разведки. Такая последовательность ведения геохимических поисков от региональных мелкомасштабных съемок до самых детальных исследований наиболее рациональна и общепринята, что не исключает возможных отступлений.

Оценки ожидаемой рудоносности территорий (района, участка) и выявляемых рудопроявлений должны выражаться в цифрах ожидаемых запасов металла уже на ранних стадиях съемочно-поисковых работ для обоснования перехода к последующим стадиям работ.

При самой различной достоверности методика подсчета запасов может считаться правильной, если соответствующие оценки Q_H являются не смещенными, равновероятно отклоняясь от истинных запасов в сторону завышения и занижения:

$$Q_H = Q_{\text{ист}}\varepsilon^{\pm t}, \qquad (29)$$

где $\varepsilon > 1$ — стандартный множитель, зависящий от детальности исследований; $t = 1, 2, 3\ldots$ определяется требованиями к доверительному интервалу оценок. При этом следует иметь в виду условный смысл цифры «истинных запасов» $Q_{\text{ист}}$, зависящей от выбранного бортового содержания металла и от глубины подсчета, которая может отличаться от глубины прогнозной оценки H. Прогнозные (геологические) запасы металла неразведанных месторождений, ожидаемые на исследуемых территориях, именуются ресурсами и, в зависимости от стадии работ, делятся на

Таблица 9

Стадии геологоразведочного процесса и оценки прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых

Стадия	Виды и масштабы геохимических съемок	Категории ресурсов
1. Региональное геологическое изучение территории СССР: а) региональные геолого-геофизические исследования масштаба 1 : 1 000 000 — 1 : 500 000; б) региональные геофизические, геологосъемочные, гидрогеологические и инжеиерно-геологические работы масштаба 1 : 200 000 (1 : 100 000)	Региональные геохимические съемки: наземные (1 : 200 000 и мельче), аэрогеохимические (1 : 100 000 и мельче)	P_3
2. Геологосъемочные работы масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000) с общими поисками 3. Поисковые работы	Поисковые геохимические наземные и воздушные съемки (1 : 50 000—1 : 25 000). Глубинные геохимические съемки (1 : 100 000 — 1 : 50 000)	P_2
4. Поисково-оценочные работы	Детальные литохимические съемки по вторичным ореолам рассеяния: наземные (1 : 10 000 и крупиее), глубиниые (1 : 25 000 и крупнее). Поиски по первичным ореолам (1 : 10 000 и крупнее)	P_1
5. Предварительная разведка 6. Детальная разведка 7. Доразведка месторождения: а) не освоенного промышленностью; б) разрабатываемого 8. Эксплуатационная разведка	Геохимические исследования в масштабах 1 : 1000 — 1 : 200 путем сплошиого опробования рудовмещающих пород и руд по горным выработкам и керну скважин	$P_1 — C_2$

три категории, обозначаемые (в сторону возрастающей достоверности) P_3, P_2 и P_1. В табл. 9 приведена привязка этих категорий прогнозных ресурсов к стадиям геологоразведочного процесса и масштабам геохимических съемок. Цифры промышленных запасов, подсчитанные в результате разведки месторождения, выявленного по геохимическим данным, служат единственным критерием эффективности поисков, а степень сходимости с ними цифр прогнозных оценок — критерием правильности количественной интерпретации геохимических данных.

Замечательной особенностью первичных геохимических данных является их объективный характер, свободный от влияния личных взглядов исполнителей. В итоге, помимо прямых открытий новых месторождений, в результате геохимических съемок создаются карты долговременного пользования, пригодные для различных геологических выводов.

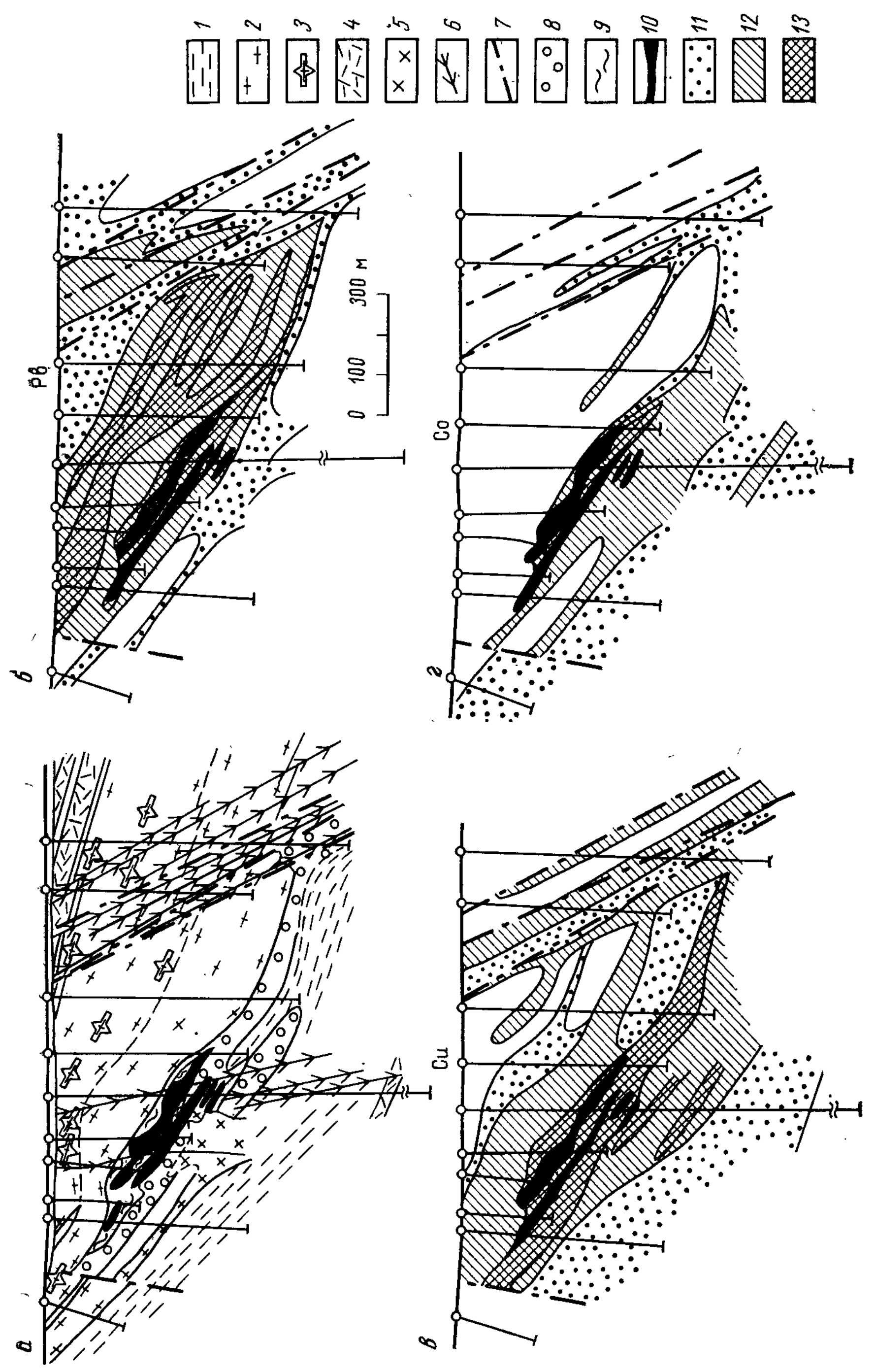
Глава 4

ПЕРВИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

4.1. РУДНОЕ ТЕЛО И ЕГО ПЕРВИЧНЫЙ ОРЕОЛ

Каждая залежь полезного ископаемого по периферии промышленных содержаний ценных компонентов окружена областью их убывающих (некондиционных) содержаний, постепенно приближающихся к местному фону. Эти представления о первичных геохимических ореолах полезных ископаемых (см. рис. 3) сформировались применительно к рудным месторождениям и получили наибольшее значение при поисках и разведке этих месторождений. Поэтому теоретические основы геохимических методов поисков по первичным ореолам рассматриваются на примере рудных месторождений, хотя основные положения этой методики без существенных поправок применимы к поискам любых твердых полезных ископаемых, а в принципе и месторождений нефти и газа. При ориентировке геохимических поисков на выявление первичных ореолов, превышающих по эффективным размерам в плане контур промышленной залежи и надстраивающих ее по вертикали, обнаружение новых месторождений существенно облегчается. Пример первичных ореолов одного из колчеданно-полиметаллических месторождений Рудного Алтая показан на рис. 54. Здесь площадь первичных ореолов Pb, Cu и Co в плоскости разведочного профиля многократно превышает суммарную площадь рудных тел.

Обнаруженные при поисках и разведке зоны аномальных содержаний химических элементов в коренных рудовмещающих породах могут иметь различную природу и масштаб. «Явные» аномалии, с промышленным или близким к нему содержанием металлов принято именовать рудопроявлениями. При соответствующих масштабах они причисляются к разряду промышленных рудных тел и месторождений. В геологопоисковой практике получили употребление термины «непромышленное рудопроявление», «рудная точка» и «минералогическая находка», характеризующие убывающий масштаб рудной минерализации. Литохимическую аномалию в рудовмещающих породах допустимо называть «первичным ореолом» только при условии доказанного или предполагаемого ее развития, вокруг или около рудного тела или месторождения. Широкое распространение получил термин «эндогенный ореол», под которым понимается первичный ореол эндогенного месторождения. Первичные ореолы вокруг экзогенных (первичноосадочных) рудных месторождений по аналогии следовало бы именовать «экзогенными ореолами».



Поскольку образование первичных ореолов обязано рудоотложению, т. е. процессам концентрации химических элементов, не следует называть их «ореолами рассеяния», оставляя этот термин для обозначения вторичных (гипергенных) геохимических ореолов, возникающих в процессе ликвидации (рассеяния) ранее сформированных месторождений.

Первичный ореол основного рудного элемента в границах нижнего аномального содержания, в первом приближении, воспроизводит в расширенном виде контур рудного тела, с отступлениями, подчиняющимися структурно-тектоническому, магматическому или литолого-стратиграфическому контролю оруденения. Контуры первичных ореолов элементов-спутников могут повторять в расширенном или уменьшенном виде ореол основного элемента или иметь существенно иную форму, в частности, обособляться в околорудном или надрудном пространстве. На рис. 54 отчетливо видно тяготение первичных ореолов Pb к висячему, а ореолов Co — к лежачему боку рудных тел.

Многие рудные месторождения — важнейшие объекты современной горно-промышленной разработки характеризуются отсутствием четких геологических границ. Оконтуривание таких месторождений производится по результатам опробования исходя из рентабельности их отработки при определенных среднем ($C_р$) и минимальном (бортовом) содержаниях металла в добываемых рудах. На стадии детальной разведки месторождений обязательно рассматриваются до пяти и более цифр средних и бортовых содержаний металла с целью выбора оптимального варианта его эксплуатации. Оруденелые породы за контуром бортового содержания при этом каждый раз относятся к первичному ореолу месторождения (включая забалансовые руды). Часто после длительной отработки крупных месторождений принимаются решения о снижении бортового содержания металла в добываемых рудах, вследствие чего размеры рудных тел увеличиваются за счет их «первичных ореолов». Для некоторых типов месторождений граница между рудным телом и его первичным ореолом имеет геологический смысл. Так, например, агрегативные сульфидные руды или кварцевая жила могут слагать полезное ископаемое, первичный ореол которого развит во вмещающих породах. Однако в области выклинивания таких рудных тел по простиранию, по падению или восстанию граница полезного ископаемого определяется минимально-

Рис. 54. Геологический разрез (*а*) и распределение аномальных концентраций Pb(*б*), Cu(*в*) и Co(*г*) в вертикальном поперечном разрезе через центральную часть Золотушинского рудопроявления [5].

1 — осадочные породы; *2* — кварцевые порфиры; *3* — лавобрекчии кварцевых порфиров; *4* — туфы кислого состава; *5* — субвулканические кварцевые порфиры; *6* — дайки; *7* — разломы; *8* — микрокварциты; *9* — хлоритолиты; *10* — рудные тела; *11—13* — первичные ореолы в порядке возрастании концентраций элемента (*13* — поля максимальных концентраций)

промышленной мощностью тех же руд, нередко подвергаемой пересмотру. Поэтому во всех случаях граница руда — первичный ореол имеет не геохимический, а только временный, геолого-экономический смысл. Внешняя граница первичного ореола, если он не ограничен позднейшими тектоническими нарушениями или эрозионным срезом, в равной мере имеет условный смысл в силу асимптотического приближения аномальных содержаний химических элементов к уровню местного фона (см. гл. 1). Однотипность элементного и минерального состава руд и первичных ореолов соблюдается достаточно широко: очевидно, что месторождение, оконтуренное по бортовому содержанию 0,5 % металла, будет иметь в первичном ореоле при содержаниях металла 0,49 % все тот же минеральный состав. Это не исключает безминеральных форм нахождения части элементов в рудах и ореолах. Одновременность образования рудного тела и его ореола не только вытекает из условных границ между промышленными и ореольными концентрациями металлов, но и содержится в определении термина «первичный ореол». Аномальные содержания рудных элементов, образованные не одновременно с рудным телом, в результате других процессов, не могут именоваться его первичным ореолом.

Литохимические аномалии вслед за их обнаружением требуют оценки. Эта задача смещается в область методики разведки, если скважина, канава или шурф встретили богатое или мощное рудное тело, хотя и в этом случае геохимические исследования играют существенную роль. Важнейшую геолого-поисковую задачу, в решении которой геохимическим методам принадлежит основная роль, составляет оценка непромышленных проявлений рудной минерализации, допускающих предположение об их принадлежности к числу первичных ореолов скрытых рудных тел. Альтернативные решения, которые приходится при этом рассматривать, иллюстрирует рис. 55. Все пять поисковых скважин пересекли зону минерализации, но только в случаях *а* и *в* непромышленная минерализация заслуживает разведки на глубину. В случаях *а* и *б* сходные результаты могла дать проходка канав или шурфов, аналогичные непромышленные проявления обнаруживаются при опробовании стенок подземных горных выработок. Множество незначительных проявлений рудной минерализации первичными ореолами месторождений не являются, большинство из них принадлежит к разряду мелких рудопроявлений, зон рассеянной минерализации и рудных точек, многократно превышающих число промышленных месторождений (см. табл. 5). Решение о принадлежности выявленной аномалии к надрудному ореолу или к другим горизонтам рудной зоны принимается на основе анализа ее устойчивых геохимических характеристик с учетом генетического типа оруденения.

Рудное тело и его первичный ореол должны рассматриваться в качестве единой, сложно построенной литохимической

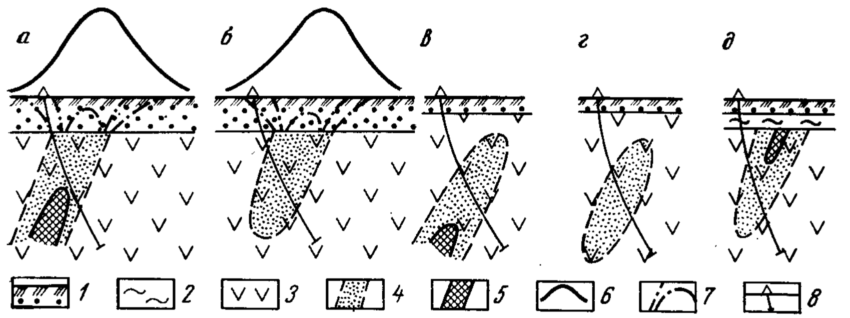


Рис. 55. Возможные геологические разрезы при встрече скважинами непромышленной минерализации.

Оруденение на современной поверхности: *а* — первичный надрудный ореол; *б* — зона рассеянной минерализации (ЗРМ) или подрудный первичный ореол. Оруденение в скрытом залегании: *в* — первичный надрудный ореол слепого рудного тела; *г* — ЗРМ; *д* — подрудный первичный ореол погребенного месторождения.
1 — элювио-делювий; *2* — дальнеприносные отложения; *3* — рудовмещающие породы; *4* — непромышленная минерализация или первичный ореол (?); *5* — рудное тело; *6* — график содержаний рудного элемента в гипергенном ореоле рассеяния; *7* — вторичный ореол рассеяния; *8* — поисковая скважина

аномалии — зоны рудной минерализации с условным внешним контуром и определенными внутренними закономерностями пространственно-упорядоченного распределения химических элементов. Изолированное, в отрыве от рудного тела изучение геохимических характеристик первичного ореола недопустимо и способно привести только к неустойчивым выводам. Закономерности внутреннего строения рудных зон выявляются путем геохимического изучения различных по генезису, структурно-геологической и литолого-стратиграфической приуроченности хорошо разведанных месторождений главнейших промышленных типов. Численные величины параметров, характеризующих ореольные и рудные сечения эталонных месторождений служат критериями оценки литохимических аномалий при поисках. Учение об эндогенном, экзогенном и метаморфогенном рудообразовании, с которым неотделимо связана теория формирования первичных ореолов месторождений, было создано трудами многих исследователей. Генезису рудных месторождений посвящена обширная специальная литература. В теории и практике геохимических поисков рудные месторождения воспринимаются как объективно существующие реальности, однако успешное ведение этих работ немыслимо без понимания закономерностей процессов рудообразования. В свою очередь, исследования первичных геохимических ореолов обогащают учение о рудных месторождениях дополнительными данными. Наиболее полно исследованы первичные ореолы эндогенных месторождений, изучение которых было начато Н. И. Сафроновым [35], получило развитие в серии работ С. В. Григоряна [5, 6, 17] и его школы, а также многих других отечественных и зарубежных авторов. Наибольшее вни-

мание было уделено исследованию первичных ореолов гидротермальных месторождений.

Общепринятыми являются представления о гидротермальном рудообразовании в результате выпадения металлов из горячих газово-жидких высокоминерализованных растворов, движущихся в горных породах вдоль ослабленных зон, в общем направлении из глубины к поверхности. Перенос металлов гидротермами предполагается в форме галоидных комплексов, преимущественно хлоридов типа $Na[MeCl_4]$ или $Na[MeCl_3]$, иногда фторидов, при участии гидросульфидных комплексов и CO_2. Осаждение рудных минералов из гидротерм происходит вследствие падения температуры и давления, в результате взаимодействия растворов с боковыми породами и другими водами, изменения pH и Eh и других условий, нарушающих фазовые равновесия в системе раствор — порода. Многокомпонентный состав гидротерм и различия в условиях осаждения отдельных компонентов раствора определяют минералогическую и химическую зональность оруденения. Все эти признаки в свете единства рудных и околорудных концентраций металлов находят отражение в строении и геохимических характеристиках первичных ореолов гидротермальных месторождений. Развитие их подчиняется направлению рудоконтролирующих структур и благоприятным для рудоотложения горизонтам пород. Максимально первичные ореолы распространяются вдоль предполагаемых направлений напорного течения (инфильтрации) растворов — по восстанию и простиранию рудных тел, по которым эффективные размеры ореолов могут достигать многих сотен метров. Более ограничены околорудные первичные ореолы, возникающие в результате диффузии растворов по направлению вкрест простирания рудных зон, в отдельных случаях их эффективные размеры составляют только первые метры. Однако чаще околорудные ореолы месторождений формируются в результате сочетания инфильтрации и диффузии растворов, захватывая обширную зону постепенно затухающей трещиноватости боковых пород. Вследствие этого первичные ореолы гидротермальных месторождений в сечении нередко имеют сложную форму, характеризуясь чередованием резко аномальных (инфильтрация) и повышенных околофоновых (диффузия) содержаний рудных элементов (см. рис. 54).

В отличие от одного-двух, реже трех-четырех металлов, обычно являющихся полезными компонентами рудных месторождений, геохимические исследования во всех случаях обнаруживают полиэлементный состав гидротермального оруденения. При этом имеется в виду не так называемое «присутствие» тех или иных элементов таблицы Менделеева, любой из которых, согласно закону Вернадского, при надлежащей чувствительности анализа заведомо обнаруживается в составе всех горных пород и руд (см. 1.2). В первичных ореолах и рудах гидротермальных месторождений до 30—35 и более химических элементов образуют аномальные концентрации, отчетливо указывая на их участие в процессе рудообразования.

Первичными ореолами месторождений являются зоны околорудных гидротермально измененных пород. Их оконтуривание обычно ведется визуально, реже по данным химических анализов на K, Na, Si, Al, Mg, Fe и другие петрогенные элементы, привнос или вынос которых происходит при серитизации, окварцевании, доломитизации, гематитизации и других процессах, сопровождающих рудоотложение. Однако обширные зоны измененных пород возникают и вне связи с оруденением или в дорудную стадию и служат только косвенными поисковыми признаками. Прямое поисковое значение имеют аномальные содержания рудных элементов, которые по изоконцентратам первичного ореола способны указать положение эпицентра слепой рудной залежи.

Важнейшее значение для методики геохимических поисков имеет зональность рудоотложения, т. е. закономерное изменение соотношений между двумя или несколькими компонентами оруденения по простиранию, падению и мощности рудной зоны. Наиболее полно зональность постмагматических месторождений была впервые рассмотрена В. Эммонсом в 1924 г., отметившим закономерное изменение состава оруденения с глубиной и в зависимости от положения относительно материнской интрузии. Широкую известность получили установленные им ряды зонального отложения рудных элементов (по направлению падения температуры и глубины): Sn, W, As, Bi, $Au_{(1)}$, Cu, Zn, Pb, Ag, $Au_{(2)}$, Sb, Hg [47]*. Геохимические исследования первичных ореолов гидротермальных месторождений подтверждают и расширяют данные о рядах отложения элементов.

А. А. Сауков первый обратил внимание на поисковое значение ртути, которая благодаря своим халькофильным свойствам и высокой летучести способна образовать надрудные первичные ореолы в связи с сульфидными месторождениями различных металлов. Расширяя представления об индикаторной роли отдельных элементов, Н. И. Сафронов указал на существование надрудных первичных ореолов галоидных элементов и, в частности, иода. Последующие исследования В. З. Фурсова, Н. А. Озеровой, М. А. Лаппа, Б. А. Судова и многих других подтвердили правильность этих представлений. Наиболее полно вертикальная зональность первичных ореолов гидротермальных сульфидных месторождений была освещена в работах С. В. Григоряна и Л. Н. Овчинникова [5, 17, 31]. На основе изучения

* В развернувшейся дискуссии зональный ряд не вызвал возражений, но Дж. Спёрр отрицал научный приоритет Эммонса, ссылаясь на свою публикацию 1907 г. Отвечая Спёрру, Эммонс указал, что ряды зонального отложения элементов установил Л. де Лоне в 1900 г. В последующем взгляды Эммонса критиковал С. С. Смирнов. Существенный вклад в изучение зональности эндогенных месторождений принадлежит Ю. А. Билибину и В. И. Смирнову.

6 Заказ № 405

более 300 различных месторождений авторы приводят обобщенный ряд зональности отложения элементов (снизу вверх):

$W_{(1)}$—Be—$As_{(1)}$—$Sn_{(1)}$—$Au_{(1)}$—U—Mo—Co—Ni—Bi—$W_{(2)}$—$Au_{(2)}$—$Cu_{(1)}$—Zn—Pb—$Sn_{(2)}$—Ag—Cd—$Au_{(3)}$—$Cu_{(2)}$—Hg, $As_{(2)}$, Sb—Ba.

Здесь индексы 1, 2, 3 при символах элементов означают, что в зависимости от минеральных форм и ассоциаций элементы могут занимать различное положение в зональном ряду. Так, например, $Sn_{(1)}$ отвечает отложению олова в форме касситерита SnO_2, а Sn_2 — в форме более низкотемпературного станнина Cu_2FeSnS_4; $As_{(1)}$ соответствует отложению арсенопирита FeAsS, а $As_{(2)}$ — аурипигмента As_2S_3; $Cu_{(1)}$ — халькопирита $CuFeS_2$, а $Cu_{(2)}$ — тетраэдрита $3Cu_2S \cdot Sb_2S_3$. Авторы справедливо отмечают статистический характер зонального ряда, поскольку в каждом конкретном месторождении, в зависимости от его генетической принадлежности, наблюдаются те или иные перестановки, без нарушения существа общей последовательности. Приведенный ряд можно дополнить справа такими легколетучими элементами как Tl, I; определенные места в нем занимают Th, TR, Sr, B, Li, F. В составе 35—40 главнейших элементов-индикаторов оруденения Л. Н. Овчинников выделяет восемь «сквозных» элементов — Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Sn, Mo, Ba, формирующих первичные ореолы эндогенных месторождений большинства генетических типов. Семь элементов — Sc, Ti, Cr, V, Sr, Y, Zr — характерные компоненты первичных ореолов месторождений литофильных металлов (редкометальные пегматиты, грейзеновые, апогранитовые и др.) и сидерофильных металлов. Пять элементов — Be, Na, K, Bi, W — участвуют в образовании первичных ореолов литофильных месторождений и обширной халькофильной группы месторождений, включая содержащие сульфиды золоторудные, редкометальные и флюоритовые месторождения. Из ореолов многих месторождений возможен вынос железа с образованием зон осветления, а также элементов группы железа — Ti, V, Cr, Sc, иногда других элементов [31].

Наблюдаемая зональность гидротермальных месторождений осложняется многостадийным характером рудоотложения и последующим метаморфизмом, однако существование общей устойчивой закономерности не ставится под сомнение. Для объяснения универсального характера зонального ряда отложения элементов приводятся различные физико-химические обоснования — константы растворимости соединений элементов, показатели устойчивости простых и комплексных ионов при различных значениях pH и Eh, различия в скорости перемещения (подвижности) гидратированных ионов в растворе, значеиия энергии кристаллических решеток и др. Н. И. Сафронов со ссылкой на Маккея [35] считал основной причиной зонального отложения элементов из гидротерм различия их ионизационных потенциалов, с увеличением которых возрастает энергия гидратации иона и снижается его подвижность. А. А. Маракушев зональность

оруденения связывает с показателями сродства элементов к протону и сере, указывая в зависимости от характера среды ожидаемые ряды отложения, близкие к наблюдаемым. Отложение рудных элементов из гидротерм, несомненно, зависит от многих одновременно действующих причин и, по справедливому замечанию П. Н. Овчинникова, бесплодность попыток объяснить зональность рудообразования с позицией решающей роли какого-то одного фактора достаточно очевидна. Можно предполагать, что именно огромное разнообразие и соизмеримость одновременно действующих факторов определяют наблюдаемую устойчивость рядов зонального отложения элементов, когда вполне очевидные варианты частных условий не изменяют (или изменяют очень мало) конечный результат.

Наиболее отчетливо у крутопадающих гидротермальных тел проявлена вертикальная зональность. Отражают ее различия отметок по глубине максимумов отложения отдельных рудных элементов. Пример графиков линейной продуктивности оруденения $M_p = f(z)$, характеризующих размещение этих максимумов, показан на рис. 56. В данном случае зональный ряд отложения элементов отвечает последовательности (снизу вверх) Co, (Cu, Zn), As, Hg, согласуясь с универсальным рядом. В целом рудоотложение протекает на фоне снижающейся температуры, а для каждого отдельного элемента — в условиях, достаточно близких к изотермическим. Поэтому для характеристики гидротермального оруденения удобно пользоваться понятиями о «высокотемпературных» (Sn, W, Mo, Co и др.), «среднетемпературных» (Ni, Cu, Zn, Pb) и «низкотемпературных» (Ag, As, Sb, Hg и др.) элементах и ассоциациях, давно приобретшими устойчивый геологический смысл.

Общегеологические представления о гидротермальном рудоотложении и результаты изучения первичных геохимических

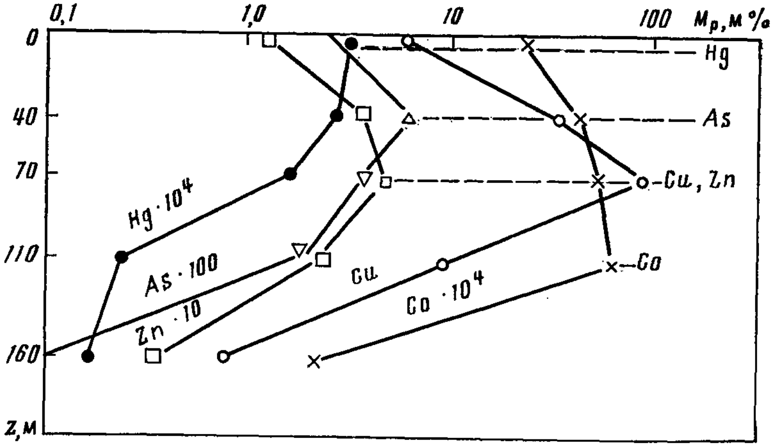


Рис. 56. Графики изменения с глубиной линейных продуктивностей элементов. *По А. С. Малахову.*

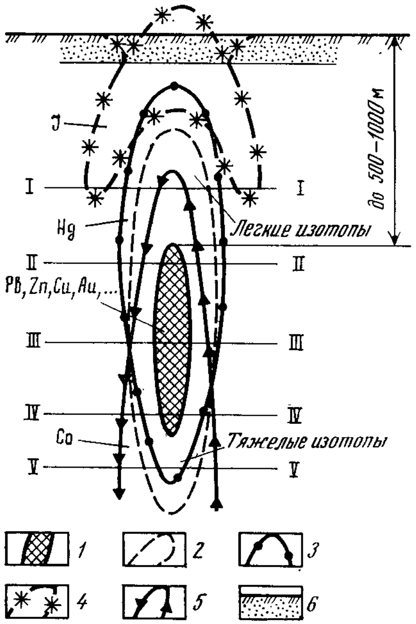


Рис. 57. Модель первичных ореолов гидротермального месторождения.

1 — рудное тело. Первичные ореолы: *2* — свинца; *3* — ртути; *4* — йода; *5* — кобальта; *6* — современные отложеиия.
Римскими цнфрами обозначены номера горизонтов

ореолов позволяют построить обобщенную модель первичных ореолов эндогенных месторождений. Упрощая и схематизируя реальную картину, эта модель в своей основе суммирует эмпирические данные, накопленные различными авторами. Вокруг крутопадающего тела полиметаллических руд основные рудные элементы (Pb, Zn, Cu, Au, ...) образуют первичные ореолы, условно повторяющие его форму. Более низкотемпературные элементы-спутники (Ag, As, Hg, ...) образуют первичные ореолы, смещенные по восстанию относительно рудного тела, в надрудном пространстве обособляются ореолы легколетучих элементов (Cl, Br, I, ...). Эту картину дополняют смещенные по падению от центра рудного тела ореолы элементов высокотемпературной ассоциации (W, Mo, Co, ...). Для других типов гидротермальных месторождений основными рудными элементами, в частности, могут быть Sn, W, Mo, Be, непромышленными элементами-спутниками Cu, Pb, а роль легколетучих компонентов надрудного ореола может принадлежать F и Li. Для удобства при описании этой модели рудный элемент условно назван «свинец», низкотемпературный элемент-спутник — «ртуть», высокотемпературный — «кобальт» и легколетучий элемент — «йод» (рис. 57).

В условиях глубокого залегания слепого рудного тела на современной дневной поверхности и в ближайших к ней горизонтах рудовмещающих пород первичный ореол может образовать только иод. На уровне I (надрудного) горизонта тот же иод может образовать две изолированные аномалии, располагающиеся по обе стороны от ореолов ртути и свинца. Бедные ореольные содержания свинца и ртути могут быть одинаково характерны и для I, и для V горизонтов рудной зоны. Поэтому по абсолютным содержаниям элементов типоморфного комплекса невозможно различать надрудный (I) и подрудный (V) интервалы первичного ореола, эта задача решается только по соотношениям между содержаниями элементов. Анализ графиков $M_p=f(z)$ для этой модели показывает, что максимальные количества иода отлагались выше I уровня, ртути — между I

и II горизонтами, наибольшие количества свинца отвечают III горизонту, максимум отложения кобальта лежит на V горизонте или ниже. Взаимное положение максимумов M_p для разных элементов, в согласии с приведенными выше данными, отвечает зональному ряду (снизу вверх): Co, Pb, Hg, I. Судить о вертикальной последовательности отложения элементов по различным отметкам их максимальных количеств M_p можно только в условиях постоянства физико-механических и физико-химических свойств рудной зоны. Любые изменения трещиноватости и пористости рудовмещающих пород, смена их петрографического состава, наличие в разрезе экранирующих горизонтов и другие причины приводят к раздувам и пережимам оруденения. Обусловленные этим многочисленные максимумы и минимумы M_p, совпадающие по глубине для целой группы элементов, маскируют последовательность их отложения. Поэтому, в отличие от модели, в реальных условиях не максимумы M_p, а г р а ф и к и о т н о ш е н и й между количествами двух элементов характеризуют их взаимное положение в зональном ряду. Помимо закономерного тяготения более низкотемпературных и легколетучих элементов к верхним горизонтам рудной зоны, надрудные ореолы могут обогащаться легкими изотопами элементов и соответственно нижние горизонты — тяжелыми изотопами за счет их различной диффузионной подвижности [36]. Общая протяженность надрудных первичных ореолов гидротермальных месторождений над верхней кромкой промышленных руд по имеющимся данным может достигать 300—500 и более 1000 м.

Первичные ореолы собственно магматических месторождений возникают при ликвационной и кристаллизационной дифференциации расплава, ведущей к рудообразованию. Этим путем формируются сингенетические месторождения медно-никелевых сульфидных вкрапленных руд в нижних частях дифференцированных ультраосновных интрузий. В промышленных рудах этого типа содержание меди и никеля достигает нескольких процентов, областью первичного ореола является верхняя зона убогих вкрапленников, отвечающая незавершенности процесса к моменту застывания массива (рис. 58). Зональное распределение металлов по вертикали обнаруживается и в данном случае, будучи обязано опережающему продвижению на глубину более тяжелого пентландита $(Fe, Ni)_9S_8$ (d=4,95 г/см^3) по сравнению с более легким халькопиритом $CuFeS_2$ (d=4,28 г/см^3). Менее изучены первичные ореолы собственно осадочных, экзогенных рудных месторождений. Генезис некоторых весьма крупных стратиформных медных, свинцово-цинковых и золоторудных месторождений носит спорный характер.

Первичные ореолы осадочных месторождений обнаруживают все признаки доскладчатого происхождения, подчиняясь литолого-стратиграфическому, фациальному контролю. В условиях первичного залегания они распространяются в горизонтальном

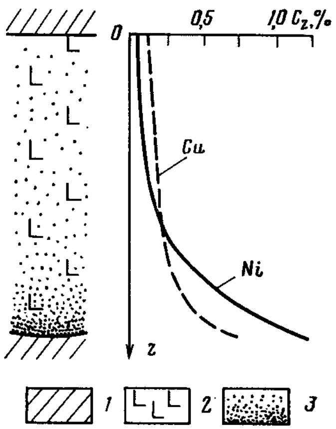
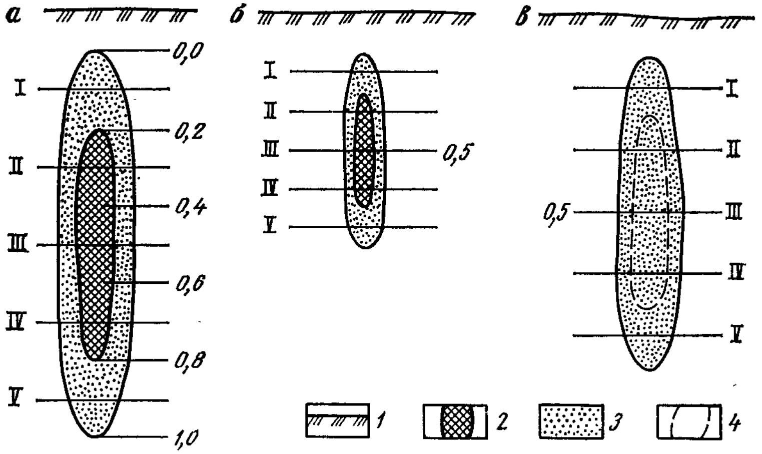


Рис. 58. Вертикальный разрез магматогенного месторождения и кривые содержаний меди и никеля.

1 — вмещающие породы; *2* — ультраосновные породы; *3* — вкрапленность сульфидов

Рис. 59. Схема расположения горизонтов в принятой условной метрике для генетически однотипных рудопроявлений.

а — *б* — рудопроявления разных категорий крупности; *в* — непромышленное рудопроявление. *1* — дневная поверхность; *2* — кондиционные руды; *3* — непромышленные содержания металла; *4* — контур промышленных руд после снижения кондиций



или близком к нему направлении и, при смене литологического состава осадков, в перекрывающие толщи не прослеживаются. Осадочным рудным месторождениям и их первичным ореолам в равной мере свойственно зональное строение, характеризующее направленное изменение условий осадконакопления на геохимических барьерах (см. раздел 1.8). Зональное распределение рудных элементов осадочных месторождений характеризуют известные триады Н. М. Страхова: Al—Fe—Mn для условий гумидного литогенеза и Cu—Pb—Zn для условий аридного литогенеза, отражающие последовательность отложения этих металлов по мере удаления от береговой линии бассейна седиментации [44]. Своими особенностями морфологии и элементного состава характеризуются первичные ореолы месторождений фосфоритов, современные или древние аллювиальные и морские россыпи и другие месторождения осадочного генезиса.

В контуре первичного ореола основного (ценного) элемента полезного ископаемого удобно пользоваться обозначениями 0,0

для начала и 1,0 для конца его аномальных содержаний вдоль любого линейного направления. Эта метрика служит для установления расстояний между двумя сечениями рудной зоны и определяет положение отдельного пересечения в контуре залежи. Для крутопадающих рудных тел отметка 0,0 отвечает верхней выклинке рудной зоны, отметка 1,0 — нижней выклинке аномальных содержаний основного металла. Эти горизонты (сечения, уровни) в направлении осевой зональности принято именовать (рис. 59):

I — надрудный, от 0,0 до 0,2;
II — верхнерудный, от 0,2 до 0,4;
III — среднерудный (центральный), от 0,4 до 0,6;
IV — нижнерудный, от 0,6 до 0,8;
V — подрудный, от 0,8 до 1,0

и этими обозначениями мы будем пользоваться в дальнейшем.

Основные минералого-геохимические характеристики генетически однотипных месторождений не зависят от их промышленного масштаба и повторяются в сечениях, находящихся в одинаковом положении относительно рудоконтролирующих структур, путей поступления рудного вещества и размеров конкретных залежей. Для примера на рис. 59 схематически изображены три генетически однотипные крутопадающие рудные залежи одинаковой линзовидной формы, для которых сходство геохимических характеристик предполагается для одноименных горизонтов всех трех объектов, а различия ожидаются между горизонтами для каждого объекта по глубине. Объекты *а* и *б* при одинаковом качестве руд различаются по линейным размерам в два раза и, следовательно, по запасам металла в восемь раз, объекты *а* и *в*, мало различаясь по геометрическим размерам, характеризуются соответственно более высоким и более низким содержанием металла в рудной зоне. Вследствие этого объекты *а* и *б* будут принадлежать к месторождениям разных категорий крупности, а объект *в* — к непромышленному рудопроявлению. Независимо от этого, закономерности рудоотложения, свойственные данному генетическому типу, приведут к одинаковому изменению погоризонтных геохимических особенностей оруденения на интервале от его нижних до верхних выклинок. Предположение, что генетически однотипные объекты *а* и *б* будут характеризоваться несопоставимыми минералого-геохимическими особенностями только в силу их различной промышленной оценки, было бы ошибочным. Действительно, достаточно понизить бортовое содержание металла в прожилково-вкрапленных рудах только на 0,1 %, например для Cu, на 0,02 % для Mo или даже на $1 \cdot 10^{-4}$ % для Au, чтобы непромышленное рудопроявление перешло в разряд месторождений с достаточно крупными запасами руд. При таком пересмотре кондиций объект *в* с контуром руд, показанным на рис. 59 пунктиром, в промышленном отношении перестанет отличаться от объекта *а* и,

следовательно, их предыдущее геохимическое противопоставление только по признаку экономической оценки было несостоятельным.

Свойственные любому рудному объекту природные геохимические особенности, имеющие генетический смысл, не могут произвольно появляться или исчезать в зависимости от пересмотра его промышленной оценки. При наличии принципиальных минералого-геохимических различий между промышленными и непромышленными объектами они должны причисляться к разным генетическим типам (подтипам), для каждого из которых схема (см. рис. 59) будет реализоваться в полном объеме. Наличие дисперсии численных значений этих геохимических параметров для серии однотипных сечений заведомо предполагается. Принцип геохимического и геометрического подобия генетически однотипных объектов различной крупности, представления о единстве рудных и ореольных концентраций полезных компонентов, о временном характере геолого-экономических границ и оценок, принадлежат к числу фундаментальных положений методики геохимических поисков.

4.2. ПАРАМЕТРЫ ПЕРВИЧНОГО ОРЕОЛА

Описательную геологическую характеристику первичных ореолов рудных месторождений дополняет физико-математический анализ процессов рудообразования. Найденные этим путем математические зависимости позволяют по наблюденным значениям геохимического поля оценить численную величину параметров аномалий и повысить однозначность геологических выводов.

Аналитические зависимости, характеризующие процесс гидротермального ореолообразования, были предложены Р. И. Дубовым [20]., В. С. Голубевым [16], Е. М. Квятковским [22] для простых физико-химических моделей. В основе их лежит совместное решение дифференциальных уравнений материального баланса и кинетики гетерогенных химических реакций с учетом ряда допущений. В частности, наиболее удобным является раздельное рассмотрение одномерных задач о рудоотложении при фильтрации раствора вдоль ослабленной зоны при отсутствии диффузии

$$\frac{\partial C_ж}{\partial T}+U\frac{\partial C_ж}{\partial z}+\frac{\partial C_{тв}}{\partial T}=0; \qquad (87)$$

и при диффузии вещества из раствора в слабопроницаемые боковые породы

$$\frac{\partial C_ж}{\partial T}+\frac{\partial C_{тв}}{\partial T}-D\frac{\partial^2 C_ж}{\partial x^2}=0, \qquad (88)$$

где $C_ж$, $C_{тв}$ — концентрации рудного вещества соответственно

в жидкой и твердой фазах; T — время; U — скорость потока; D — коэффициент диффузии; x — направление по нормали к стенкам рудной зоны; z — направление по падению рудной зоны.

Изменение концентрации вещества в твердой фазе в условиях реакции первого порядка характеризуется уравнением

$$\frac{\partial C_{тв}}{\partial T}=KC_ж, \qquad (89)$$

где K — константа скорости реакции, в общем случае являющаяся функцией текущих координат.

Совместные решения уравнений (87) и (89) или (88) и (89) при заданных начальных и граничных условиях позволяют характеризовать распределение концентраций металла соответственно вдоль рудной зоны и в околорудном ореоле в твердой и жидкой фазах в каждый отдельный момент времени. Некоторые из этих решений рассмотрены в цитированных работах.

Количественные характеристики процесса требуют сведений об исходных концентрациях рудного элемента в жидкой фазе, о скорости движения раствора, длительности его протекания, параметрах среды и о константах реакций. Решение этой задачи заведомо многозначно, поскольку предположения о численных значениях одних величин, при фиксированном результате в форме наблюдаемых нами рудных месторождений, приводят к заранее обусловленным оценкам численных значений других величин. Обоснование методики геохимических поисков рудных месторождений по их первичным ореолам требует рассмотрения не столько процесса рудообразования, как его результата, запечатленного в форме рудных зон с неизменными в масштабе нашего времени концентрациями рудных элементов в горных породах (процессы гипергенеза в данном случае не обсуждаются). Поэтому ниже символами C_x, C_z, C_0 обозначаются доступные для непосредственного определения концентрации рудных элементов в твердой фазе ($C_{тв}$), а многочисленным показателям процесса рудоотложения ($C_ж$, U, T, K и т. д.) отводится роль неизвестных констант. Характеристикой результата рудоотложения являются численные значения тех геохимических параметров оруденения, которые поддаются определению исходя из теоретических представлений и наблюдаемых распределений химических элементов в ореолах и рудах.

В наиболее общем случае содержания рудного элемента в гидротермальном оруденении по направлению движения потока постепенно возрастают до некоторого уровня C_0, отвечающего условиям насыщения, а затем постепенно затухают вследствие расходования полезной нагрузки раствора. В простейшем случае в области верхних и нижних интервалов рудной зоны, отвечающих соответственно надрудному и подрудному первичным ореолам залежи, изменение содержаний металла с глубиной происходит по экспоненциальному закону:

$$C_z = C_0 e^{-\lambda_1 z} + C_ф, \quad (90)$$

где C_0 — концентрация металла в точках $z=0$ в начале и в конце зоны насыщения; λ_1 — параметр, характеризующий условия инфильтрационного рудоотложения.

В однородной изотропной среде по этому же закону изменяются концентрации металла в околорудном диффузионном ореоле

$$C_x = C_0 e^{-\lambda_2 x} + C_ф, \quad (91)$$

где C_0 — концентрация металла в точке $x=0$; λ_2 — параметр, характеризующий диффузионное поступление рудного элемента в боковые породы.

Зависимости (90) и (91) при полулогарифмическом масштабе построения, за вычетом фона, имеют вид прямолинейных графиков с различными наклонами (рис. 60). В зависимости от типа оруденения и свойств химических элементов, участвующих в процессе, отложение полезных компонентов может протекать в условиях насыщения на различных абсолютных отметках рудной зоны и при различной протяженности H этого интервала. Максимумы содержаний элементов-спутников могут располагаться

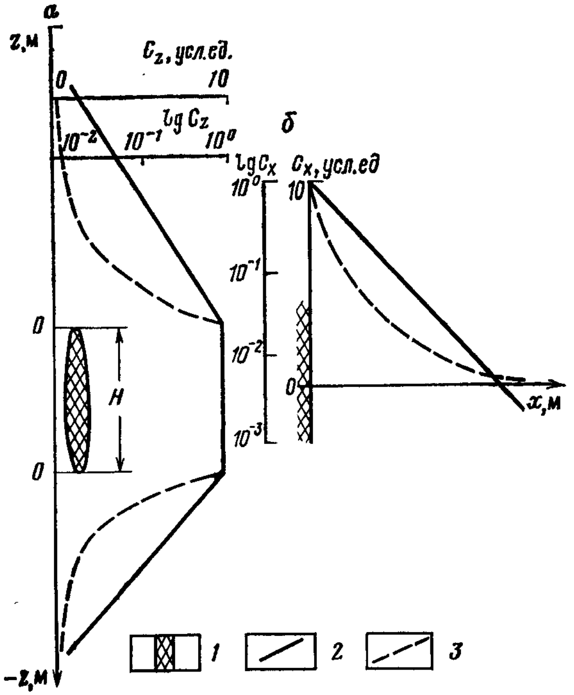


Рис. 60. Теоретические графики содержаний металла (за вычетом фона): *а* — по падению рудной зоны; *б* — в околорудном ореоле.

1 — рудное тело; графики C_z и C_x: *2* — в полулогарифмическом масштабе; *3* — в арифметическом масштабе

выше или ниже интервала промышленных руд, подобно содержаниям йода, ртути, кобальта в ореолах свинцового месторождения (см. рис. 57). Аналогичным экспоненциальным законом со своим значением параметра λ_3 характеризуется распределение рудных элементов в ореоле, образованном при гравитационной дифференциации расплава (см. рис. 58). Зависимости (90) и (91), естественно, являются не единственными, и распределения рудных элементов в ореолах и рудах часто имеют сложный характер, для которых аналитические решения не могут быть найдены. Приведенные простейшие зависимости достаточно близко соответствуют выходу на поверхность опробования самых верхних (апикальных) интервалов надрудного ореола. Именно этот случай отвечает важнейшей задаче — геохимическим поискам глубокозалегающих рудных тел. Параметры λ_1 и λ_2 иногда именуют «коэффициентами поглощения», характеризующими процесс перехода химического элемента из раствора в твердую фазу. Для анализа первичных ореолов месторождений удобнее рассматривать величину $1/\lambda$, имеющую смысл «геохимической подвижности» или «миграционной способности» элементов. Поскольку x и z выражаются в метрах и показатель степени в уравнении экспоненты величина безразмерная, параметр $1/\lambda$ измеряется в метрах, что соответствует его физическому смыслу. Величина $1/\lambda_1$ характеризует подвижность химического элемента в инфильтрационном надрудном или подрудном первичном ореоле, $1/\lambda_2$ — подвижность элемента в диффузионном околорудном ореоле, $1/\lambda_3$ — подвижность элемента в магматогенном надрудном ореоле при гравитационном оседании рудных частиц в расплаве. С численной стороны параметр $1/\lambda$ соответствует средней величине пути, пройденного атомами рудного элемента, участвовавшими в процессе. От абсолютного уровня содержаний элементов, от чувствительности и точности анализа проб и от эффективных (выявленных) размеров ореола параметр $1/\lambda$ не зависит, объективно характеризуя сравнительную геохимическую подвижность элементов.

Если график наблюденных содержаний рудного элемента, за вычетом фона, в координатах x, $\lg C_x$ или z, $\lg C_z$ удовлетворительно аппроксимируется прямой линией, параметр $1/\lambda$ поддается непосредственному определению. В этом случае $\operatorname{ctg}\omega$ угла наклона осредняющей прямой к оси x (или z) будет пропорционален величине миграционной способности элемента. Поскольку наклон прямой зависит от выбранного масштаба построения графика, абсолютное значение подвижности элемента (в метрах) найдем из выражения

$$1/\lambda = \frac{Y}{\ln 10} \operatorname{ctg}\omega = 0{,}434 Y \operatorname{ctg}\omega, \quad (92)$$

где Y — принятый модуль десятичных логарифмов содержаний элементов, выраженный в линейной мере оси расстояний.

Пример оценок миграционной способности свинца и молиб-

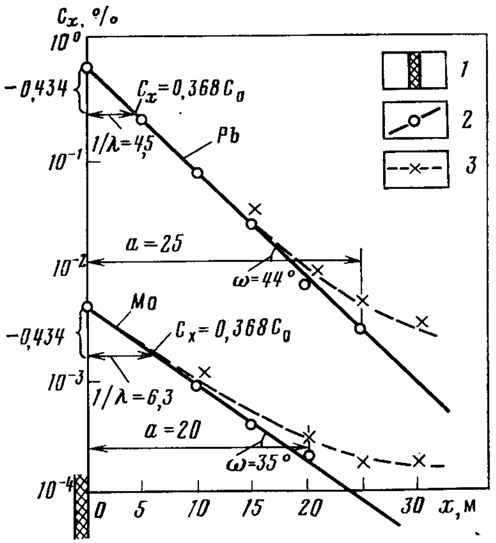


Рис. 61. Оценка миграционной способности элементов $1/\lambda$ в диффузионном первичном ореоле.

1 — рудная зона; графики содержания элементов: 2 — за вычетом фона; 3 — без вычета фона. Для Pb: $C_ф=2\cdot10^{-3}$ %; $C_A=5\cdot10^{-3}$ %. Для Mo: $C_ф=1\cdot10^{-4}$ %; $C_A=3\cdot10^{-4}$ %; *a* — эффективная полуширина ореола

дена в диффузионном околорудном ореоле показан на рис. 61. Найденные значения $1/\lambda_2(\mathrm{Pb})=4{,}5$ м и $1/\lambda_2(\mathrm{Mo})=6{,}3$ м устанавливают более высокую подвижность молибдена по сравнению со свинцом. Эффективная ширина первичного ореола свинца превышает размеры ореола молибдена и по величине непараметрических показателей (см. 1.5) можно было бы прийти к ошибочному выводу о сравнительной подвижности элементов.

Ряды подвижности элементов, устанавливаемые по величине параметра $1/\lambda$, не следует смешивать с рассмотренными выше рядами зональности отложения элементов. В первом случае речь шла о последовательности размещения (по глубине от поверхности, по мере падения температуры, удаления от активных интрузий или от береговой линии) максимумов отложения различных элементов в зоне оруденения. Эти последовательности носят устойчивый характер, что позволило установить известные ряды зонального отложения элементов при эндогенном рудообразовании. В отличие от этого, ряды миграционной способности элементов $1/\lambda_1$ и $1/\lambda_2$ даже в пределах одного месторождения изменяются по глубине рудной зоны, вплоть до перемены знака показателя диффузионной подвижности элемента $1/\lambda_2$ и образования на более глубоких горизонтах ореолов выщелачивания.

При наличии результатов опробования на двух уровнях надрудного первичного ореола, допуская соблюдение зависимости (90), можно графически оценить глубину $z_р > z_2$, на которой содержание металла в рудной зоне предположительно достигнет заданной величины $C_р$. Для этого достаточно прямую, проведенную через точки $\lg C_1$, z_1 и $\lg C_2$, z_2 продлить в сторону возрастающих содержаний металла до ее выхода на абсциссу $C_р$. Тот же результат можно получить, вычисляя $z_р$ из выражения

$$z_р = z_2 \frac{\lg C_р - \lg C_1}{\lg C_2 - \lg C_1} = z_2 \frac{\lg (C_р/C_1)}{\lg (C_2/C_1)}, \qquad (93)$$

где отсчет глубин z_2 и $z_р$ ведется от уровня $z_1=0$, C_1 и C_2 — содержания металла за вычетом фона в центральных точках первичного ореола соответственно на первом и втором уровнях.

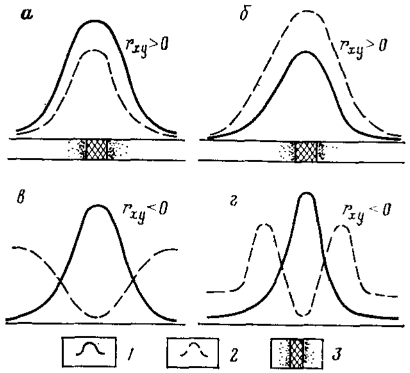


Рис. 62. Геохимические аномалии с одинаковыми коэффициентами корреляции между содержаниями рудных элементов.

а — $x/y>1$; *б* — $x/y<1$; *в* и *г* — отрицательная корреляция при различных формах аномалий. Графики содержаний элементов: *1*—*x*; *2*—*y*; *3* — рудная зона

Признаком принадлежности того или иного химического элемента к числу спутников промышленного оруденения с определенным основанием служит сильная положительная корреляция между его содержаниями и содержаниями основных полезных компонентов в ореолах и рудах. Однако *отсутствие такой связи или статистически значимая отрицательная корреляция между содержаниями двух рудных элементов не доказывает их отложения в разные стадии процесса*. Действительно, возвращаясь к обобщенной схеме первичного ореола (см. рис. 57), заранее допуская, что кобальт, свинец, ртуть и йод отложились в одну стадию, можно обнаружить, что наряду с сильной положительной корреляцией на определенных гипсометрических уровнях связь между содержаниями этих элементов отсутствует, имеет нелинейный характер или является отрицательной. Коэффициенты корреляции между содержаниями рудных элементов, являясь статистическими показателями, приобретают *одинаковые значения при существенно разных пространственных распределениях элементов в геохимических аномалиях* (рис. 62).

Таким образом, вся совокупность коэффициентов корреляции между содержаниями элементов, необходимая для общей геохимической характеристики рудных месторождений различных генетических типов, непригодна для диагностики надрудных первичных ореолов.

Более 200 лет тому назад горняки Рудного Алтая знали, что по падению полиметаллических залежей снижается «свинцовость» руд и растет их «цинковость», т. е. падает с глубиной величина показателя зональности $\nu=\mathrm{Pb}/\mathrm{Zn}$. Здесь и в дальнейшем в показателях зональности ν символами элементов обозначаются их количества (в м %, м^2 %) или средние содержания на горизонте опробования. Величины отношений между содержаниями (или количествами) элементов при условии их *безразмерного характера* позволяют с оди-

наковым успехом характеризовать и богатое рудное тело, и непромышленную минерализацию, устанавливая между ними сходство или различие (см. рис. 59). Если в данной точке оруденение характеризуется конкретной величиной показателя ν, то признаком геохимической зональности является изменение этой величины в пространстве, или

$$\operatorname{grad}\nu = \frac{d\nu}{dS},$$

где S — направление наибольшей изменчивости выбранного показателя.

Зональность является векторной величиной с ортогональными составляющими $\frac{\partial\nu}{\partial x}$, $\frac{\partial\nu}{\partial y}$ и $\frac{\partial\nu}{\partial z}$, где x соответствует направлению по истинной мощности рудной зоны, y — по ее простиранию и z — по падению. Очевидно, что

$$\frac{d\nu}{dS} = \sqrt{\left(\frac{\partial\nu}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\nu}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\nu}{\partial z}\right)^2}. \quad (94)$$

Изменение средних содержаний любого отдельно взятого элемента или мощности рудной зоны вдоль определенного направления не следует именовать «зональностью». В этих случаях уместно говорить об увеличении или затухании интенсивности оруденения, о богатых и бедных интервалах, выклинивании, раздувах или пережимах рудной зоны, используя для этого однозначные геологические термины. Если соотношение между двумя химическими элементами вдоль выбранного направления остается постоянным, независимо от изменения морфологии оруденения, его богатства или бедности, показатель $\nu = \text{const}$, grad $\nu = 0$, и зональность отложения этих двух элементов вдоль данного направления отсутствует. Геохимическая зональность объясняется минералогической зональностью оруденения — изменением количественных соотношений между минералами, появлением новых минеральных форм или изменением состава элементов-примесей в минералах. Поэтому геохимическая изменчивость является общим показателем зональности оруденения. Для характеристики крутопадающих эндогенных месторождений наибольшее значение имеют вертикальная зональность оруденения ν_z и зональность в плоскости рудного тела ν_{yz}, а для тел большой мощности и близких к изометрическим — в плоскости разведочного сечения ν_{xz}. В первом случае зональность характеризуют графики $\nu_z = f(z)$, в двух других случаях — соответственно карты изолиний $\nu = f(y, z)$ и $\nu = f(x, z)$. Положение вектора зональности на этих картах в любой точке определяется нормалью к направлению изолиний ν. Рассмотрение первичной зональности оруденения ограничивается контуром заведомо аномальных содержаний элементов $C_x > C_A$. Поскольку показатели ν вычисляются за вычетом фона, за пределами рудной зоны они не существуют. Закономерные изменения с глубиной величин отношений между содержаниями металлов в рудах эндогенных месторождений отмечались многими авторами еще в 30-е годы, например, убывание с глубиной показателей Ag/Au или Cu/As соответственно для золоторудных и медных месторождений.

По величине показателя $\nu = \text{Pb/Zn}$ У. X. Браун установил предполагаемые пути движения гидротерм при формировании месторождения Остинвилл в США. Позднее аналогичные исследования на руднике Блайклиппен в Гренландии провел У. X. Гросс. Полученные им весьма выразительные данные (рис. 63) показывают, что в рудной зоне на протяжении 300 м величина этого показателя изменяется в 20 000 раз. На карте изолиний $\nu_{yz} = \text{Pb/Zn}$ отчетливо фиксируется положение вектора зональности, отвечающее падению температуры декрепитации кварца.

При геохимических поисках показатели отношений между содержаниями U, Mo и Pb для характеристики вертикальной зональности урановых месторождений были впервые рассмотрены А. Д. Каблуковым и Г. И. Вертеповым в 1960 г. В дальнейшем различные показатели отношений между содержаниями двух или нескольких рудных элементов стали широко применяться в практике геохимических поисков слепых рудных тел. Наибольшей разрешающей способностью, позволяющей уверенно ориентироваться в метрике рудной зоны, обладают геохимические показатели, числитель и знаменатель которых сформированы из элементов, занимающих крайние положения в зональном ряду. Исходя из этого принципа С. В. Григоряном был выбран геохимический показатель для оценки ореолов свинцово-цинковых месторождений

$$\nu = \frac{\text{Ag}\cdot\text{Pb}\cdot\text{Zn}}{\text{Cu}\cdot\text{Bi}\cdot\text{Co}}.$$

Численные значения этого показателя в интервале глубин порядка 600 м уменьшаются в 30 000 раз, устойчиво характеризуя зональность исследованных полиметаллических месторождений, существенно различных по условиям формирования. На рис. 64 приведены геохимические показатели, характеризующие зональность медного рудопроявления в Южном Казахстане. Здесь в интервале от надрудного до нижнерудного горизонтов (≈ 700 м) величина показателя зональности изменяется в 62 млн. раз. Численные значения подобных показателей для хорошо разведанных месторождений принимаются за эталонные. При геохимических поисках для последующей разведки на глубину выделяются аномалии с величинами геохимических показателей ν, близкими к их верхним значениям. Аномалии с малыми величинами ν, предположительно отвечающие подрудным интервалам, с учетом геологических данных, призна-

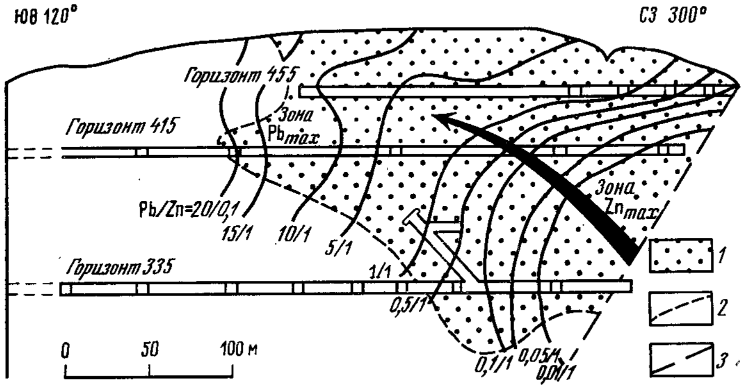


Рис. 63. Продольный вертикальный разрез рудника Блайклиппен с изолиниями $\nu = Pb/Zn$.

1 — руда; *2* — примерная граница рудного штока; *3* — северный секущий разлом. Стрелка указывает предполагаемое направление движения гидротерм. *По У. Х. Гроссу*

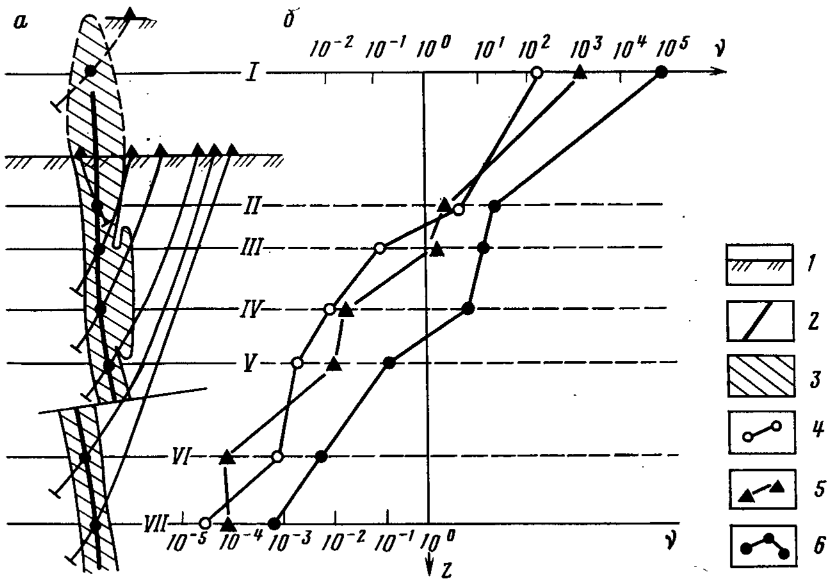


Рис. 64. Сводный профиль (*а*) и графики геохимических показателей зональности (*б*) медного рудопроявления.

1 — дневная поверхность; *2* — рудное тело; *3* — первичный ореол. Графики: *4* — $\nu = \frac{Pb \cdot Zn}{Cu \cdot Mo}$, $\nu_I/\nu_{VII} = 5{,}5 \cdot 10^6$; *5* — $\nu = \frac{Pb \cdot As}{Mo^2}$, $\nu_I/\nu_{VII} = 2{,}1 \cdot 10^7$; *6* — $\nu = \frac{Pb \cdot As}{U \cdot Co}$, $\nu_I/\nu_{VII} = 6{,}2 \cdot 10^7$. Римские цифры — номера горизонтов

ются бесперспективными. Методы изучения геохимической зональности эталонных месторождений, выбора и последующего применения показателей зональности более подробно рассматриваются в следующем разделе. Здесь отметим только, что при наличии данных об изменении величин показателей зональности с глубиной, по наклону графиков $\nu_z = f(z)$ к горизонту можно судить о величине коэффициента подобия $\varkappa \gtrless 1{,}0$ генетически однотипных месторождений, согласно зависимости

$$\varkappa = \operatorname{tg} \alpha_1 / \operatorname{tg} \alpha_2. \qquad (95)$$

Геометрическое обоснование этой зависимости иллюстрирует рис. 65. Независимые оценки коэффициента подобия при условии геохимического опробования двух однотипных объектов в интервале промышленного оруденения, отлагавшегося в усло-

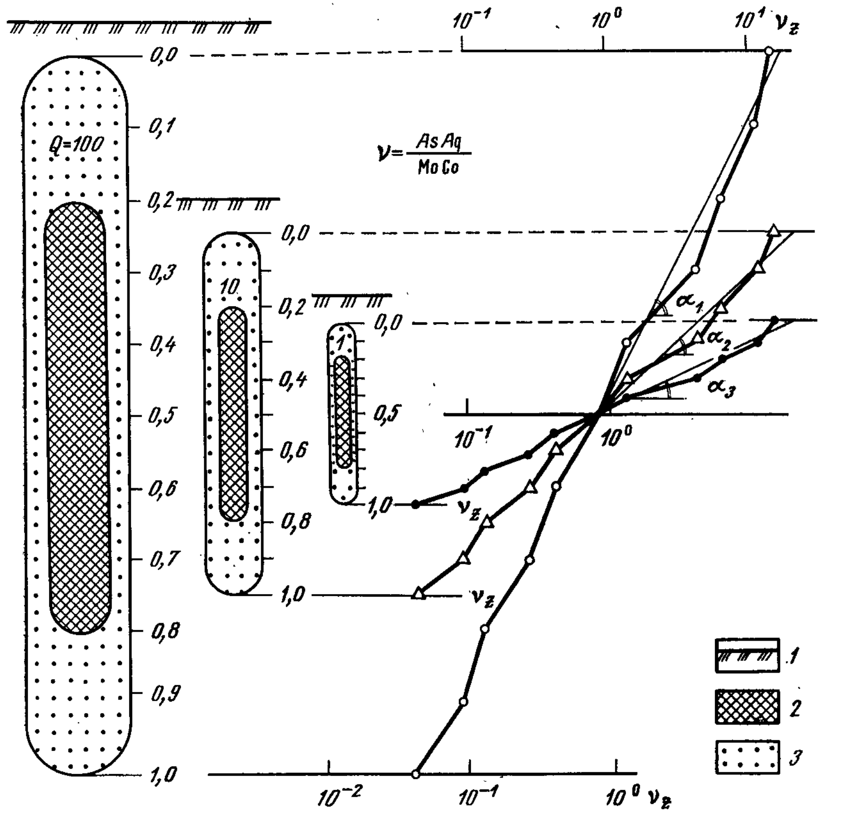


Рис. 65. Графики геохимических показателей зональности для генетически однотипных месторождений различной крупности.

1 — дневная поверхность; *2* — рудное тело; *3* — первичный ореол основного рудного элемента

виях «насыщения», или на горизонтах, одноименных в метрике 0,0—0,2, можно получить из соотношений

$$\varkappa = (M_p)_1 : (M_p)_2 = \sqrt{(P_p)_1 : (P_p)_2}. \quad (96)$$

Полные запасы металлов в таких объектах будут находиться в соотношениях

$$Q_1 = \varkappa^3 Q_2, \quad (97)$$

что следует из принципа геометрического подобия генетически однотипных объектов различной крупности (см. 1.6).

В качестве одного из параметров оруденения Н. И. Сафронов предложил оценивать энергию рудообразования, позволяющую в сравнимых условных единицах количественно характеризовать различные по составу многоэлементные геохимические аномалии [36, 37]. Исходя из ряда упрощающих допущений, расчет энергии, затрачиваемой на рудообразование, ведется по схеме термодинамики изотермического сжатия (и разрежения) идеальных газовых смесей, в качестве аналогов которых рассматриваются «пустые» горные породы (например, гранитоиды). В этом случае затраты энергии на формирование единицы объема руды E из расчета на один элемент составят

$$E = K_к \ln K_к; \quad (98)$$

$$E_п = \sum_{i=1}^{n} (K_к)_i \ln (K_к)_i, \quad (99)$$

где $E_п$ — полная энергия рудообразования с учетом энергий сжатия и разрежения всех компонентов системы.

Весьма простые и наглядные выражения (98) и (99) являются аналогами меры уменьшения энтропии системы, используемой в теории информации [8]. Из выражения (98) вытекает невозможность существования нулевых содержаний элементов, поскольку такое «разрежение» потребовало бы бесконечно больших затрат энергии, что подтверждает закон Вернадского (см. 1.2).

Выведенное Н. И. Сафроновым выражение (99) для подсчета энергии рудообразования позволяет обосновать физический смысл перемножения и деления друг на друга содержаний двух или нескольких рудных элементов в многокомпонентных геохимических показателях зональности ν или при построении мультипликативных ореолов. Так как величины энергии выражаются через логарифмы концентраций, перемножение и деление аномальных содержаний элементов отвечает соответственно сложению и вычитанию величин, пропорциональных энергии их привноса. Следовательно, физический смысл показателя зональности ν отвечает разности энергии (в джоулях), затраченной на отложение надрудных элементов, образующих его числитель, и энергии отложения подрудных элементов знаменателя.

4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНАЛЬНОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

При геохимических поисках показатели зональности оруденения служат наиболее надежными критериями надрудных первичных ореолов, уровня эрозионного среза месторождений и прогноза оруденения на глубину. Поэтому методы выявления и последующего использования этих показателей заслуживают подробного рассмотрения.

Геохимические поиски слепых месторождений и рудных тел по их первичным ореолам слагаются из двух взаимосвязанных видов работ: изучения геохимической зональности хорошо разведанных месторождений данного генетического типа и проведения собственно поисковых исследований. Выполняются эти работы с учетом установленных критериев, путем массового «объемного» опробования горных пород, в основном стенок подземных выработок и керна скважин, в первом случае по известным рудным зонам, во втором — на флангах и глубоких горизонтах рудных полей тех же месторождений. Накопленный за последние десятилетия обширный опыт позволяет проводить геохимические поиски по первичным ореолам, минуя первую стадию работ. Однако изучение геохимической зональности разведываемых и эксплуатируемых промышленных месторождений остается обязательным, поскольку оно обеспечивает более правильное понимание их генезиса, структуры рудного поля и его резервов. Одновременно эти исследования уточняют геохимические критерии поисков. В данном разделе рассматривается методика геохимических исследований только геологически детально изученных (эталонных) месторождений.

Основу этих исследований составляет многогоризонтное геохимическое опробование рудных зон по пересечениям через 50—100 м, желательно с выходом в обе стороны в область, близкую к фоновым содержаниям элементов-индикаторов. Под «геохимическим опробованием» обычно понимается непрерывное пунктирное опробование горных пород и руд секциями по 2—5 м (масса проб 300—350 г) с последующим экспресс-анализом этих проб на 35—40 химических элементов[1]. Эталонные месторождения желательно опробовать в полном контуре их первичных ореолов, что для крутопадающих месторождений отвечает интервалу от надрудного (I) до подрудного (V) горизонтов или, в условной метрике рудной зоны, от 0,0 до 1,0 (см. рис. 59). Это не всегда возможно — верхние горизонты месторождений могут быть срезаны эрозией, отработаны и

[1] Взамен пунктирного опробования возможен отбор навесок 50 г из дубликатов геологоразведочных (бороздовых) проб, что предпочтительно.

недоступны для опробования или разведочные выработки и скважины не достигают подрудных горизонтов. Поэтому в реальных условиях ставится задача максимально полного охвата изучаемого месторождения линиями геохимического опробования. В благоприятных условиях это опробование распространяется за пределы первичного ореола основного рудного элемента, в область ореолов «иода» и «кобальта», в увязке со схемой рис. 57. Вопрос о достаточности геохимического опробования будет рассмотрен ниже.

Результаты анализа проб изображаются в форме графиков и моноэлементных карт изоконцентраций на основе маркшейдерских погоризонтных планов и разрезов, обычно в масштабе 1 : 1 000—1 : 2 000. По этим данным принимаются решения об интервалах подсчета линейной продуктивности для жильных зон (M, м %) или средних содержаний рудных элементов ($\bar{C}_x - C_ф$) для тел прожилково-вкрапленных руд изометрической формы. Результаты подсчетов служат входными данными для анализа зональности изучаемого месторождения.

Первоначально определяются ряды зонального отложения элементов. В действующей Инструкции [21] по геохимическим методам поисков рудных месторождений в прилож. 26 подробно изложен метод определения последовательности отложения элементов по глубине путем пересчета их линейных продуктивностей в «метрогеофоны» и вычисления по уровням рудной зоны отношений продуктивностей каждого элемента к сумме продуктивностей всех остальных. В результате положение элемента в зональном ряду определяется номером уровня, на котором его относительная продуктивность достигает максимума. Число рассматриваемых элементов (например, 10—12) всегда больше числа опробованных уровней (например, 4—5), максимумы продуктивностей элементов совпадают по глубине, поэтому для их ранжирования дополнительно вычисляются градиенты продуктивностей.

Тот же результат можно получить, рассматривая графики парных отношений между линейными продуктивностями (средними содержаниями) элементов по уровням. Если величина отношения двух элементов ν падает с глубиной, элемент числителя отлагался выше элемента, стоящего в знаменателе, если их отношение возрастает — элемент числителя отлагался ниже элемента знаменателя. Поскольку графики парных отношений между элементами могут иметь сложный вид, вычисляются координаты z их «центров тяжести» согласно зависимости

$$z = \sum_{i=1}^{f} \nu_i f_i / \Sigma \nu_i, \qquad (100)$$

где f_i — номер опробованного уровня рудной зоны (1, 2, 3, ..., f); ν_i — соответствующие величины отношений между продуктивностями (средними содержаниями) двух элементов. Если «центр тяжести» графика лежит выше точки $\frac{1+f}{2}$, график имеет убывающий с глубиной вид, если ниже — возрастающий. Вычисляя z с точностью до 0,1 «уровня», имеем 40—50 мест для ранжирования элементов при тех же 4—5 опробованных уровнях. При этом нет необходимости пересчитывать продуктивности в метрогеофоны, вычислять их относительную величину и рассматривать градиенты.

Способ «центров тяжести» позволяет весьма просто в найденном зональном ряду определить положение дополнительного рудного элемента. Для этого достаточно найти два смежных элемента из числа ранее рассмотренных, с одним из которых новый элемент, будучи в числителе, образует график ν_z, убывающий с глубиной, а со вторым — возрастающий. По первому способу при добавлении нового элемента все пересчеты должны в полном объеме делаться заново, поскольку изменяется сумма продуктивностей всех элементов-индикаторов.

Затем выявляются отношения между продуктивностями (средними содержаниями) элементов, однозначно характеризующие зональность оруденения. Этим требованиям наилучшим образом удовлетворяют геохимические показатели зональности ν_x, ν_y и ν_z, однонаправленно (монотонно) изменяющиеся в пределах рудной зоны, включая рудное тело и его первичный ореол. Ранее было показано, что абсолютные содержания любого отдельно взятого элемента не могут характеризовать зональность оруденения. Непригодны для этой цели и отношения между содержаниями элементов, которые в различных сечениях рудной зоны принимают одинаковые численные значения. Эти условия возникают, если убывание (или рост) величины ν вдоль заданного направления сменяется ее возрастанием (убыванием) и такие незакономерные колебания повторяются. График показателя геохимической зональности при переходе от уровня к уровню может иметь ломаный характер, но знак его градиента не должен изменяться. Задача сводится к рассмотрению различных отношений между элементами с целью выбора из их числа монотонно изменяющихся показателей зональности. Решение этой задачи удобно рассмотреть на примере крутопадающего гидротермального оруденения.

Наличие зонального ряда отложения элементов позволяет предвидеть убывающий или возрастающий характер графиков ν_z для конкретных пар элементов, но не характеризует их монотонности. Поиски однозначных показателей зональности начинаются с анализа графиков отношений между двумя элементами. Среди этих показателей I порядка нужные нам монотонные ν_z могут отсутствовать, их число может быть невелико, а разрешающая сила недостаточна. В этих случаях неизбежно обращение к показателям II ($\nu^{II} = 2/2$) и более старших порядков ($\nu^{III} = 3/3$, $\nu^{IV} = 4/4$ и т. д.), число которых прогрессивно возрастает и многократно превышает число парных

отношений между элементами. Геохимические показатели ν^{II}, ν^{III}..., являясь произведением соответственно двух, трех или большего числа показателей I порядка, по физическому смыслу отвечают разности энергии рудообразования для элементов числителя и знаменателя, определяемых формулой (99). В показатели старших порядков один или несколько элементов могут входить во второй, третьей или другой более высокой степени, вплоть до ее равенства порядку показателя. В частном случае произведение двух немонотонных показателей может изменяться с глубиной монотонно. Не могут считаться новыми только показатели, являющиеся простыми степенями показателей младших порядка типа $(\nu^{I})^2$, $(\nu^{I})^3$, $(\nu^{II})^2$, $(\nu^{I})^4$ и т. п.

Рассчитанные по этим зависимостям числа различных отношений от I до III порядка между содержаниями от 3 до 14 химических элементов показаны в табл. 16. Уже при 14 химических элементах общее число возможных ν I—III порядков приближается к 100 тыс., что существенно повышает вероятность выявления монотонно изменяющихся показателей зональности месторождений при корректной постановке задач. Прибегать к рассмотрению такого числа отношений между содержаниями элементов нет необходимости.

Однако невозможно заранее предугадать, какая из их комбинаций обеспечит монотонность и оптимальный характер показателей II или более высоких порядков. Поэтому совместный анализ до нескольких сотен и более тысячи различных ν оказывается вполне оправданным.

Таблица 16

Число возможных отношений между элементами

Число химических элементов	Порядок ν			Всего *
	I	II	III	$\binom{1}{1}+\binom{2}{2}+\binom{3}{3}$
3	3	6	9	12
4	6	21	38	53
5	10	55	170	215
6	15	120	505	610
7	21	231	1 281	1 491
8	28	406	2 884	3 262
9	36	666	5 916	6 546
10	45	1035	11 265	12 255
11	55	1540	20 185	21 670
12	66	2211	34 386	36 531
13	78	3081	56 134	59 137
14	91	4186	88 361	92 456

* В графе дано число различных ν без учета простых степеней показателей I порядка.

Рассмотрение такого числа геохимических показателей на четырех-пяти и большем числе уровней рудной зоны невозможно без применения ЭВМ.

Наилучшим образом исследование зональности месторождений выполняется по программе «Ню-2», разработанной В. А. Николаевым. Результаты обработки по этой программе на ЭВМ ЕС-1022 геохимических данных, представленных А. А. Шигановым, показаны на рис. 66 и 67.

Золоторудное месторождение, условно названное «Южным», исследовалось в качестве одного из эталонных для кварцево-жильного типа оруденения. Вмещающими породами месторождения являются интрузивные породы гранодиоритового ряда, прорывающие песчано-алевролитовую толщу ордовика. Оруденение представлено крутопадающими и отходящими от них пологими кварцевыми жилами со свободным золотом, пиритом, арсенопиритом и подчиненным количеством других сульфидов. Исследование зональности месторождения, как это видно из заголовка распечатки (см. рис. 66), было начато 1 ноября 1981 г. в 13 ч 56 мин.

Для обработки предъявлены данные погоризонтного геохимического опробования трех золоторудных жил — Главной (4 уровня), Тукеновской (3 уровня) и Пологой (4 уровня) в форме линейных продуктивностей восьми типоморфных элементов оруденения. По заданию предусматривалось отыскание показателей зональности, общих для всех трех рудных жил, что отражено в заголовке словами «объектов 3 (min 3)». В зависимости от пожеланий пользователя, программа допускает отыскание показателей, общих для m объектов из n, где $m \leqslant n$.

Обработка по программе «Ню-2» ведется по четырем циклам, каждый из которых состоит из обязательных операций и четырех — по выбору пользователя. В данном случае заказано выполнение трех циклов — нулевого, первого и второго, последний в составе только первой и четвертой операций, что отражает появление двух нулей в символе этого цикла. Далее ЭВМ печатает полную таблицу входных данных для ее сверки с оригиналом (на рисунке опущена).

Нулевой цикл обработки носит характер исследования, при котором никаких заранее установленных ограничений на его результаты не накладывается. Поочередно для каждого из объектов печатаются матрицы центров тяжестей парных отношений между продуктивностями элементов в метрике уровней со средними значениями по строчкам, на основе которых устанавливаются зональные ряды отложения элементов (снизу вверх). Вслед за этим печатаются квадратные матрицы величин отношений между элементами I порядка с графиками $\nu_z^I = f(z)$ в условном масштабе. Все величины и графики в правой верхней части матриц повторяются в обратных значениях ниже

```
            КАФЕДРА ГЕОХИМИИ      ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ       М Г У
01.11.81       13.56                  ПРОГРАММА  'НЮ2'
                  ВЫБОР ОБЩИХ МОНОТОННЫХ ОТНОШЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ
 М-ИЕ ЮЖНОЕ: 1)ЖИЛА ГЛАВНАЯ(У-НИ 1,2,3,4); 2)ЖИЛА ТУКЕИОВСКАЯ(У-НИ 1,2,3);
  3)ЖИЛА ПОЛОГАЯ(У-НИ 4,3,2,1)    ОБ'ЕКТОВ  3 (MIN   3);ЭЛЕМЕНТОВ, 8;
  ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ЦИКЛЫ: 0.1111 1.1111 2.1001
```

РАСПЕЧАТКА ВХОДНЫХ ДАННЫХ

```
01.11.81      13.56          М-ИЕ ЮЖНОЕ
ЦИКЛ 0-1111
ОБ'ЕКТ  Ж. ГЛ.
          ЦЕНТРЫ ТЯЖЕСТИ ОТНОШЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТРИКЕ УРОВНЕЙ

                          ЭЛЕМЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ
         AU     AG     MO     PB     CO     AS     ZN     CU    СРЕД
      AU 2.5    1.8    2.1    1.9    1.5    1.6    1.6    1.1    1.7
      AG 3.5    2.5    2.6    2.4    1.8    2.1    2.0    1.3    2.2
      MO 3.6    2.4    2.5    2.2    1.6    2.0    1.8    1.2    2.1
      PB 3.7    2.7    2.6    2.5    2.0    2.4    2.2    1.5    2.4
      CO 3.8    3.2    3.1    3.0    2.5    3.0    2.8    1.9    3.0
      AS 3.7    2.8    2.8    2.7    2.1    2.5    2.3    1.5    2.6
      ZN 3.8    3.0    3.0    2.8    2.2    2.7    2.5    1.6    2.7
      CU 3.8.   3.2    3.1    3.1    2.7    3.0    2.9    2.5    3.1

            ЗОНАЛЬНЫЙ РЯД ОТЛОЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ (СНИЗУ ВВЕРХ)
                     CU-CO-ZN-AS-PB-AG-MO-AU
            ОТНОШЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ 1-ГО ПОРЯДКА
                      ЭЛЕМЕНТЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ
--------------------------------------------------------------------------------
IЛИСТ 1I    AU     I    AG     II    CO     I    AS     I    ZN     I    CU     I
--------------------------------------------------------------------------------
I     I 1I 1.00E+00I 2.01E+00I I 5.73E-01I 2.59E-03I 1.34E-01I 7.26E-01I
I     I 2I 1.00E+00I 1.37E+00I I 2.95E-01I 1.43E-03I 8.80E-02I 7.33E-02I
I     I 3I 1.00E+00I 9.42E-01I I 5.75E-02I 5.90E-04I 2.52E-02I 1.44E-02I
I     I 4I 1.00E+00I 1.61E-01I I 7.12E-03I 9.28E-05I 3.16E-03I 3.02E-03I
IAU   I..I.........I.........I I.........I.........I.........I.........I
I     I 1I    *    I        *I I        *I        *I        *I        *I
I     I 2I    *    I       * I I       * I       * I       * I       * I
I     I 3I    *    I      *  I I    *    I    *    I    *    I  *      I
I     I 4I    *    I*        I I*        I*        I*        I*        I
--------------------------------------------------------------------------------
I     I 1I 4.96E-01I 1.00E+00I I 2.84E-01I 1.29E-03I 6.66E-02I 3.60E-01I
I     I 2I 7.31E-01I 1.00E+00I I 2.15E-01I 1.05E-03I 6.43E-02I 5.36E-02I
I     I 3I 1.06E+00I 1.00E+00I I 6.11E-02I 6.26E-04I 2.67E-02I 1.53E-02I
I     I 4I 6.20E+00I 1.00E+00I I 4.42E-02I 5.75E-04I 1.96E-02I 1.87E-02I
IAG   I..I.........I.........I I.........I.........I.........I.........I
I     I 1I*        I    *    I I        *I        *I        *I        *I
I     I 2I *       I    *    I I       * I      *  I        *I   *     I
I     I 3I  *      I    *    I I *       I *       I  *      I*        I
I     I 4I        *I    *    I I*        I*        I*        I *       I
--------------------------------------------------------------------------------....
      РАНГОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ РЯДАМИ ЗОНАЛЬНОСТИ.
                                      ---------------------------------
                                      IОБ"ЕКТ I  Ж. ГЛ. Ж. ТУК Ж. ПОЛI
(КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ (5%): 0,74)     ---------------------------------
                                      I Ж. ГЛ.I   1     0.524  0.762 I
                                      I Ж. ТУКI 0.524     1    0.214 I
                                      I Ж. ПОЛI 0.762   0.214    1   I
                                      ---------------------------------

      ОБЩИЙ ЗОНАЛЬНЫЙ РЯД ОТЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ(СНИЗУ ВВЕРХ)
                     CU-ZN-CO-AS-PB-MO-AG-AU
```

Рис. 66. Фрагмент распечатки результатов обработки по программе «Ню-2». Цикл 0.1111. Месторождение Южное


```
01.11.81      13.57   М-ИЕ ЮЖНОЕ  ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  1-ГО ПОРЯДКА
ЦИКЛ 1-1111
  ------------  ---------------------------  --------------------------
  I ЛИСТ    1 I I        (AU)/(ZN)         I I        (AG)/(ZN)        I
  ------------  ---------------------------  --------------------------
  I    УРОВНИ I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I       УБЫВАЮЩИЙ         I
  IОБ'ЕКТ     I I    НЮ        НЮ/MIN      I I    НЮ        НЮ/MIN     I
  I Ж. ГЛ.1   I I 1.34E-01  4.25E+01       I I 6.66E-02  3.40E+00      I
  I        2  I I 8.80E-02. 2.79E+01       I I 6.43E-02  3.28E+00      I
  I        3  I I 2.52E-02  7.96E+00       I I 2.67E-02  1.36E+00      I
  I        4  I I 3.16E-03  1.00E+00       I I 1.96E-02  1.00E+00      I
  I    УРОВНИ I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I       УБЫВАЮЩИЙ         I
  IОБ'ЕКТ     I I    НЮ        НЮ/MIN      I I    НЮ        НЮ/MIN     I
  I Ж. ТУК1   I I 4.73E-01  2.19E+01       I I 8.19E-02  6.67E+00      I
  I        2  I I 1.13E-01  5.23E+00       I I 4.66E-02  3.80E+00      I
  I        3  I I 2.16E-02  1.00E+00       I I 1.23E-02  1.00E+00      I
  I    УРОВНИ I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I УСЛОВНО УБЫВАЮЩИЙ       I
  IОБ'ЕКТ     I I    НЮ        НЮ/MIN      I I    НЮ        НЮ/MIN     I
  I Ж. ПОЛ1   I I 3.17E-01  1.36E+01       I I 2.59E-02  3.03E+00      I
  I        2  I I 2.55E-01  1.09E+01       I I 1.30E-02  1.52E+00      I
  I        3  I I 5.31E-02  2.28E+00       I I 2.90E-02  3.39E+00      I
  I        4  I I 2.33E-02  1.00E+00       I I 8.56E-03  1.00E+00      I
  ------------  ---------------------------  --------------------------
  I    УРОВНИ I I                          I I                         I
  IОБ'ЕКТ     I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I       УБЫВАЮЩИЙ         I
  I Ж. ГЛ.1   I I                *         I I                   *     I
  I        2  I I              *           I I                 *       I
  I        3  I I         *                I I            *            I
  I        4  I I  *                       I I      *                  I
  I    УРОВНИ I I                          I I                         I
  IОБ'ЕКТ     I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I       УБЫВАЮЩИЙ         I
  I Ж. ТУК1   I I                    *     I I                    *    I
  I        2  I I               *          I I               *         I
  I        3  I I         *                I I     *                   I
  I    УРОВНИ I I                          I I                         I
  IОБ'ЕКТ     I I       УБЫВАЮЩИЙ          I I УСЛОВНО УБЫВАЮЩИЙ       I
  I Ж. ПОЛ1   I I                  *       I I          *              I
  I        2  I I                 *        I I      *                  I
  I        3  I I            *             I I           *             I
  I        4  I I         *                I I  *                      I
  ------------  ---------------------------  --------------------------....
01.11.81      13.58  М-ИЕ ЮЖНОЕ
ЦИКЛ 2-1001                         ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  2-ГО ПОРЯДКА
   ------------------------------------------------------------------
   I ЛИСТ    1 I    (AU*AU)/(PB*AS)      I   (AU*AG)/(PB*CO)       I
   ------------------------------------------------------------------
   I    УРОВНИ I      УБЫВАЮЩИЙ          I      УБЫВАЮЩИЙ          I
   IОБ'ЕКТ     I    НЮ        НЮ/MIN     I    НЮ        НЮ/MIN     I
   I Ж. ГЛ.1   I 1.30E-04  8.25E+02      I 1.42E-02  1.90E+02      I
   I        2  I 2.54E-05  1.62E+02      I 3.82E-03  5.10E+01      I
   I        3  I 2.16E-05  1.37E+02      I 2.23E-03  2.99E+01      I
   I        4  I 1.57E-07  1.00E+00      I 7.49E-05  1.00E+00      I
   I    УРОВНИ I      УБЫВАЮЩИЙ          I      УБЫВАЮЩИЙ          I
   IОБ'ЕКТ     I    НЮ        НЮ/MIN     I    НЮ        НЮ/MIN     I
   I Ж. ТУК1   I 2.23E-04  6.17E+01      I 3.09E-02  2.97E+01      I
   I        2  I 1.03E-04  2.85E+01      I 8.86E-03  8.49E+00      I
   I        3  I 3.62E-06  1.00E+00      I 1.04E-03  1.00E+00      I
   I    УРОВНИ I      УБЫВАЮЩИЙ          I      УБЫВАЮЩИЙ          I
   IОБ'ЕКТ     I    НЮ        НЮ/MIN     I    НЮ        НЮ/MIN     I
   I Ж. ПОЛ1   I 2.33E-03  1.38E+02      I 1.76E-02  1.32E+01      I
   I        2  I 2.31E-03  1.37E+02      I 1.63E-02  1.23E+01      I
   I        3  I 2.34E-05  1.38E+00      I 3.28E-03  2.46E+00      I
   I        4  I 1.69E-05  1.00E+00      I 1.33E-03  1.00E+00      I....
   ------------------------------------------------------------------
              ЧИСЛО РАССМОТРЕННЫХ ОТНОШЕНИЙ 2-ГО ПОРЯДКА  406
                     ЧИСЛО ОБЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ      32

     JOB /NU2       / START .1356
     JOB /NU2       / STOP  .1359 CPU   2MIN 06.84SEC
```

Рис. 67. Фрагмент распечатки результатов обработки по программе «Ню-2». Циклы 1.1111 и 2.1001. Месторождение Южное.

их диагоналей, что создает определенные удобства для пользователя. Фрагменты всех этих данных показаны на рис. 66 объекта «жила Главная». Выявленная последовательность отложения элементов, за исключением Mo, не портиворечит универсальному ряду зональности. Среди отношений I порядка монотонно убывают с глубиной величины Au/Ag, Au/Co, Au/As, Au/Zn, Ag/Co и ряд других, хотя отношения Au/Mo и Au/Pb изменяются незакономерно. После выдачи аналогичных данных по двум другим объектам ЭВМ вычисляет ранговые коэффициенты корреляции между выявлеными частными рядами отложения элементов и общий зональный ряд по сумме мест занимаемых элементами в частных рядах.

На приведенной распечатке видно, что из трех коэффициентов корреляции значим на 5%-ном пределе только один (0,76), хотя все они имеют положительную величину и частные ряды зрительно сходны. В пределах имевшихся данных общий ряд зонального отложения элементов следует считать установленным.

Устойчивое крайнее справа положение золота в частных рядах и наличие достаточного числа непрерывно убывающих по глубине отношений золота к элементам-спутникам исключает предположение о наличии второго эшелона оруденения в непосредственной близости к нижним опробованным уровням крутопадающих жил. Поэтому результаты исследований по нулевому циклу позволяют перейти к поискам общих для трех объектов монотонно изменяющихся показателей зональности, не опасаясь, что это условие способно исказить истинную зональность оруденения. В более общем плане поиски монотонных показателей зональности для эталонных месторождений оправданы их относительно хорошей разведанностью. В сочетании с обработкой данных детального геохимического опробования по нулевому циклу программы «Ню-2» это исключает пропуск слепого оруденения на глубине.

Содержанием трех следующих циклов обработки является поочередное рассмотрение всех геохимических показателей I—III порядков с выдачей на печать монотонных одновременно для всех заданных объектов. На рис. 67 даны фрагменты распечаток исследования зональности месторождения «Южное» по четырем операциям первого цикла. В данном случае, хотя необходимости в этом не было, в учебных целях на печать выводились также условно монотонные показатели с нарушением монотонности на одном из уровней, как это наблюдается для показателя Ag/Zn по жиле Пологой. Восемь химических элементов согласно табл. 16 образуют 28 показателей I порядка, из которых монотонными и условно монотонными для трех объектов оказались 24, что говорит о высокой геохимической упорядоченности рудных жил. По отдельным объектам безусловно монотонными оказались для жилы Главной 10 показателей, для Тукеновской 18 и для Пологой 7. Однако общими одновременно для всех трех жил оказались только три показателя I порядка — Au/Co, Au/Zn и Au/Cu.

Помимо численных значений монотонных и условно монотонных показателей на печать выдаются величины их различий между уровнями по отношению к ν_{min}, а также строятся их графики. Аналогичным образом были исследованы показатели II порядка без учета условно монотонных и без построения графиков ν_z. В результате из 406 рассмотренных показателей монотонными для всех трех рудных жил оказались 32 показателя II порядка, из которых легко выбрать нужное число показателей для последующего применения при поисках. Исследование зональности месторождения «Южное» закончилось в 13 ч 59 мин, т. е. потребовалось около 2 мин 7 с машинного времени, как это следует из завершающей распечатки «старт» и «стоп» (см. рис. 67). В данном случае обработка по третьему циклу не проводилась.

Широкие возможности для выявления монотонных показателей зональности, которые открылись с переходом к рассмотрению многочисленных отношений между элементами II, III и более высоких порядков, выдвинули вопрос о критериях неслучайности получаемых результатов. Можно в качестве входных данных для обработки по программе «Ню-2» предложить серию случайных величин, имитирующих результаты погоризонтного геохимического опробования. Несмотря на геологическую бессмысленность этих данных, с определенной вероятностью среди рассмотренных отношений между этими величинами будут выявлены показатели различных порядков, изменяющиеся монотонно по всем уровням фиктивной рудной зоны.

Очевидно, что любой набор из f отношений между случайными величинами ν_1, ν_2, $\nu_3 \ldots \nu_f$ можно ранжировать, расположив их в убывающем или возрастающем порядке. Из числа всех остальных вариантов, являющихся неупорядоченными, только эти две последовательности будут монотонными. Вероятность случайного события, каким является появление монотонной последовательности для f независимых величин, определяется отношением числа благоприятных случаев (два) к общему числу возможных перестановок ($f!$) или

$$\Pi = 2/f!, \qquad (101)$$

где $f!$ — факториал числа f, в нашем случае — числа опробованных уровней.

При поисках показателей зональности на них накладывается условие одновременной монотонности для объектов, образующих композицию. Дополнительным ограничением для монотонных показателей $(m-1)$ объектов является их одинаковый с первым объектом убывающий или возрастающий вид, что в 2 раза снижает вероятность их появления. Для независимых случайных величин вероятность сложного события опре-

деляется произведением частных вероятностей:

$$\Pi_{\text{комп}} = \frac{2}{f_1!} \cdot \frac{1}{f_2!} \cdot \frac{1}{f_3!} \cdots \frac{1}{f_m!}. \qquad (102)$$

Аналогичным более сложным выражением определяется вероятность в случае «объектов n, min m», где $n>m$.

Выражение (102) позволяет оценить число ожидаемых случайно монотонных последовательностей $N_{\text{сл}}$ в составе выбранной композиции $\Pi_{\text{комп}}$, если одновременно рассматривается N независимых показателей:

$$N_{\text{сл}} = N\Pi_{\text{комп}}. \qquad (103)$$

Реализация случайного события может отличаться от математического ожидания, оставаясь с заданной вероятностью в определенных границах. Соответственно этому Ю. В. Шваровым рассчитана номограмма для оценки по величине $N\Pi$ числа $N_{\text{кр}}$ — ожидаемых на 95%-ном доверительном пределе случайно монотонных показателей ν при независимом характере входных данных (рис. 68).

Возвращаясь к результатам исследования зональности месторождения «Южное», имеем по формуле (102)

$$\Pi_{\text{комп}} = \frac{2}{4! \times 3! \times 4!} = \frac{1}{1728}$$

или для показателей II порядка согласно табл. 19 и формуле (103)

$$N\Pi = \frac{406}{1728} = 0{,}235,$$

откуда по номограмме находим, что $N=1$. Фактически было выявлено 32 монотонных показателя, что указывает на их неслучайный характер.

Рассмотренные зависимости (101)—(103) позволяют сформулировать критерии достаточности исследования зональности эталонных месторождений. Для уверенного выбора нужного числа геохимических показателей зональности ν число выявленных общих монотонно изменяющихся отношений между элементами должно быть заведомо больше числа возможных случайных. Желательно, чтобы $N_{\text{кр}}$ — ожидаемое число случайных значений ν не превышало 2—3, поскольку при $N_{\text{кр}} \geqslant 10$ независимо от числа выявленных показателей снижается надежность их выбора для последующего применения. Если при исследовании конкретного месторождения число выявленных ν равно N, то это не означает, что найденные монотонные отношения между элементами являются случайными. Это указывает только на то, что такое число монотонно изменяющихся показателей по законам комбинаторики можно ожидать при случайном, геологически бессмысленном характере входных данных.

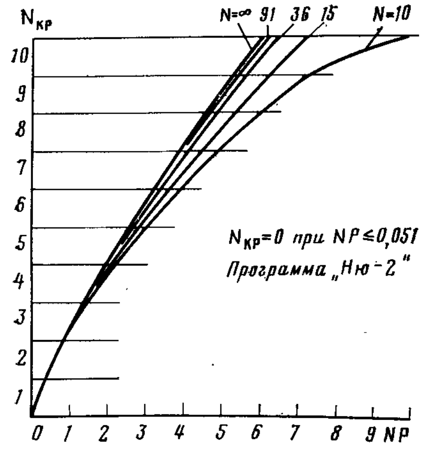


Рис. 68. Номограмма для оценки критического числа случайно-монотонных показателей (95%-ный доверительный предел). *По Ю. В. Шварову.*

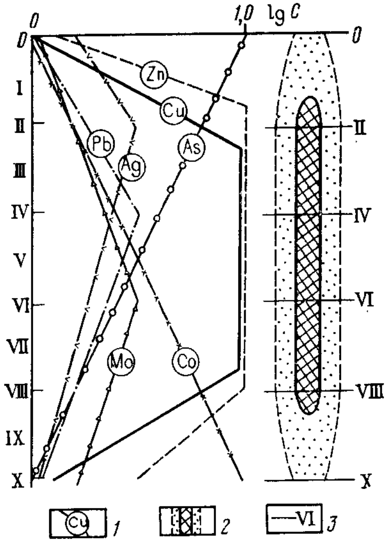


Рис. 69. Модель эндогенного оруденения (вертикальный разрез).

1 — графики содержаний рудных элементов; 2 — рудное тело и его первичный ореол; 3 — 0—X уровни (горизонты) рудной зоны

Выбранные показатели зональности в метрике рудной зоны 0,0—1,0 должны обладать достаточно большим размахом R, равным $\nu_{\max}/\nu_{\min}$, и должны в этом интервале изменяться относительно равномерно. По составу химических элементов в числителе и знаменателе выбранные ν должны соответствовать установленному зональному ряду отложения элементов, а по набору элементов — максимально различаться между собой. Обычно для выбора показателей зональности ограничиваются рассмотрением показателей II порядка (циклы 0, I и II). При недостаточности полученных результатов исследования зональности эталонного месторождения следует продолжить путем анализа показателей III порядка или привлечения дополнительных данных геохимического опробования. Для исследования по программе «Ню-2» не следует составлять излишне сложные композиции, поскольку уже при $N\Pi \leqslant 0{,}051$ случайно монотонные показатели не ожидаются ($N_{\text{кр}}=0$). При дальнейшем уменьшении величины $N\Pi$ нужные показатели зональности могут не выявляться в силу природных и технических помех.

Объектами, входящими в композицию, могут быть рудные тела одного месторождения, его различные разведочные профили или несколько генетически однотипных месторождений.

Природные геологические процессы носят стохостически детерминированный характер, поэтому эмпирические данные отклоняются от простых функциональных зависимостей. Аб-

страктная модель эндогенного оруденения, свободная от природных и технических помех, позволяет выявить его главные закономерности и провести их углубленный анализ. Накладывая на идеализированную модель заранее заданные ограничения, случайные помехи н осложнения, имитирующие реальную геологическую обстановку, удается оценить их роль и обеспечить более правильную интерпретацию поисковых геохимических данных.

Исследованная модель характеризует вертикальное рудное тело, сопровождаемое первичным ореолом, ограниченное верхней и нижней выклинками и сформированное в результате одностадийного процесса (рис. 69). Содержания семи рудных элементов под условными названиями заданы за вычетом фона в пределах одного логарифмического интервала, хотя их абсолютные содержания не совпадают. Это позволило согласно формуле (90) при полулогарифмическом масштабе построения характеризовать изменения погоризонтных средних содержаний рудных элементов с глубиной ($\lg C_z$) прямыми линиями, отличающимися только своим наклоном и положением точек излома. Двум рудным элементам Zn и Cu присвоена роль основных (полезных) компонентов, отлагавшихся в рудном теле в режиме насыщения, остальным отведена роль элементов-спутников. В верхних и нижних выклинках рудного тела содержания цинка больше содержаний меди, содержания As непрерывно убывают, а содержания Co непрерывно возрастают с глубиной. Данная модель оруденения соответствует зональному ряду отложения элементов (снизу вверх): Co, Mo, Zn, Cu, Pb, Ag, As. По геохимическим характеристикам модель обобщает опыт изучения медноколчеданных месторождений Южного Урала и Мугоджар.

Для анализа модели по программе «Ню-2» выбрано 11 горизонтов через 0,1 в условной метрике. Из них первые два характеризуют надрудный ореол (0—I), семь горизонтов (II—VIII) — рудное тело, а два нижних (IX—X) — подрудный ореол. В результате исследования исходной модели найденный зональный ряд отложения элементов по центрам тяжести графиков их парных отношений отвечает истинному. Число выявленных монотонно изменяющихся показателей зональности составило: I порядка — 5 (из 21 возможных), II порядка — 29 (из 231) и III порядка — 153 (из 1281). Случайно монотонных показателей, согласно формуле (109), не ожидалось.

На модельные погоризонтные содержания элементов накладывались случайные помехи $\varepsilon = 1{,}1^{\pm t}$ и $1{,}3^{\pm t}$, распределенные логнормально с нулевым математическим ожиданием; модель исследовалась при различном числе опробованных уровней, в различных ее интервалах и с уменьшенным числом элементов. Обобщение полученных данных позволило прийти к выводу, что истинные ряды зонального отложения элементов выявляются только при исследовании полного интервала рудной зоны, от верхнего (0) до нижнего (X) уровней модели. При этом условии, независимо от наложения случайных помех, при 11, 9, 7, 6, 5 и даже 4 опробованных уровнях выявленные ряды отложения элементов совпадают с истинной последовательностью или незначительно отличаются от нее (число инверсий не более трех). Резкие отклонения от истинного ряда обнаружились при входных данных, отвечающих малым интервалам исследуемой модели. Так, при раздельном исследовании верхнего (уровни 0—IV) и нижнего (уровни VI—X) интервалов модели выявленные ряды отложения элементов существенно отличаются от заданных. Без одновременного охвата опробованием надрудных, центральных и подрудных горизонтов обнаруживаются ряды зонального отложения элементов, весьма далекие от истинных.

Негативное влияние случайных помех на результаты обработки очевидно и определяет необходимость снижения их амплитуды путем улучшения качества геохимического опробования, анализов и подсчетов. На показатели старших порядков влияние случайных помех снижается, что увеличивает возможность приобретения ими монотонности. Пример образования монотонного показателя III порядка $\nu = \frac{As \cdot Ag^2}{Pb \cdot Mo \cdot Co}$ из трех осложненных случайной помехой $1{,}3^{\pm t}$ немонотонных показателей I порядка показан на рис. 70. Регулярные помехи, в одинаковой степени изменяющие содержания всех рудных элементов (раздувы, пережимы, экраны и др.), на безразмерные показатели зональности не влияют.

Неудовлетворительные результаты были получены при раздельном исследовании зональности только верхнего интервала модели (уровни 0, I, II, IV), только среднего (уровни III, V, VI, VIII) и только нижнего (VII, IX, X). Несмотря на выявление многочисленных монотонно изменяющихся отношений I и II порядков (от 125 до 219), их противоречивый вид и большое число возможно случайных (верх и середина — более 30, низ — более 100) сделали практически невозможным выбор показателей зональности. Между рядами зонального отложения элементов для верхнего и нижнего интервалов модели обнаружилась отрицательная ранговая корреляция $r = (-0{,}54)$. В условиях реального месторождения это могло привести к ошибочному выводу о наличии обратной зональности оруденения.

В условиях, когда по отдельным разведочным профилям или рудным телам геохимическим опробованием охватываются только ограниченные интервалы рудной зоны, отчетливо проявляются достоинства программы «Ню-2». Объединяя три интервала исследуемой модели в одну композицию (рис. 71) по схеме «объектов 3 (min 3)», обнаруживаем 5 общих монотонных показателей I порядка и 29 — II порядка при одном возможно случайном и общий ряд зонального отложе-

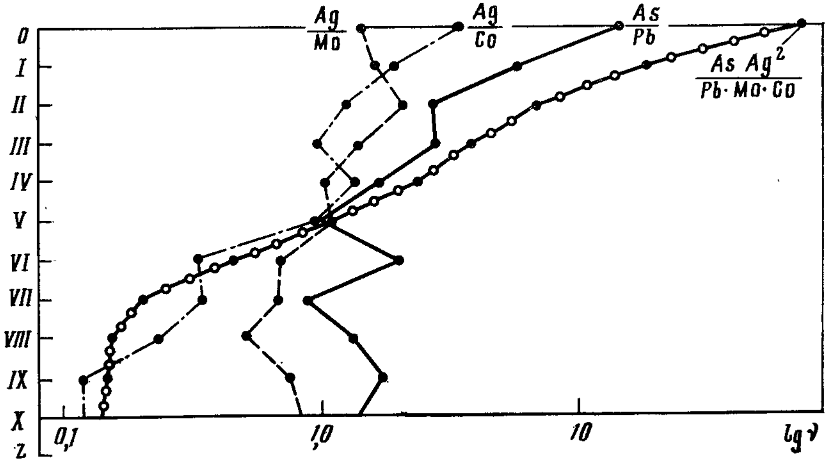


Рис. 70. Графики монотонного показателя III порядка, образованного из немонотонных показателей I порядка. *По Э. И. Бабаеву.*

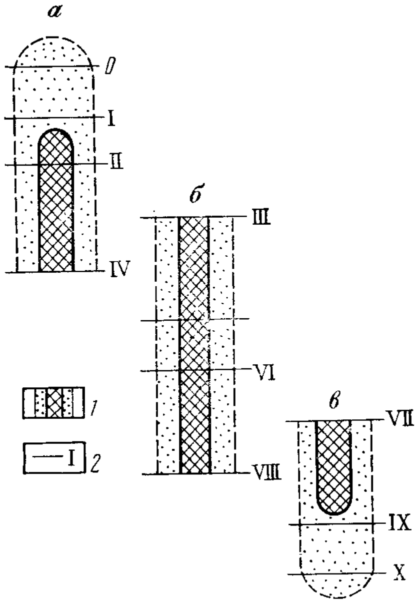


Рис. 71. Выявление полной зональности месторождения по данным опробования различных интервалов оруденения (программа «Ню-2»). *По Э. И. Бабаеву.*

Интервалы рудной зоны: *а* — верхний; *б* — средний; *в* — нижний; *1* — рудное тело и его первичный ореол; *2* — уровни (горизонты), участвующие в исследовании

ния элементов в полном соответствии с ранее полученными результатами при исследовании исходной модели по всем 11 уровням. В целом эти и другие исследования моделей доказали высокую эффективность и надежность изучения зональности месторождений с помощью программы «Ню-2».

На рис. 72—74 приведены геологические разрезы ртутного, стратиформного полиметаллического и оловорудных месторождений и показатели геохимической зональности этих месторождений, найденные путем обработки геохимических данных по программе «062-МГУ», дальнейшим развитием которой яв-

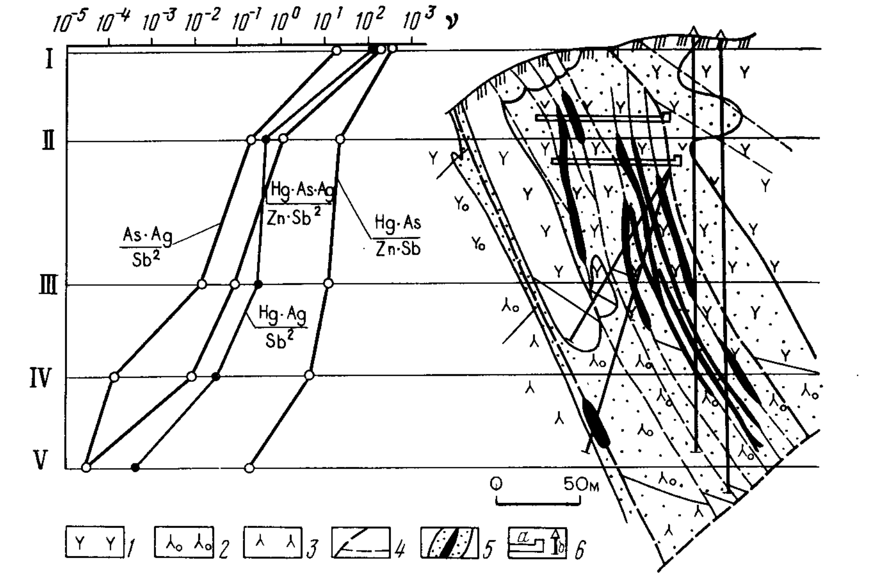


Рис. 72. Графики показателей геохимической зональности и геологический разрез одного из участков Терлигхайского ртутного месторождения. *По Г. С. Симкину.*

1—3 — нижнедевонские вулканиты: *1* — андезито-дацитовые порфириты; *2* — туфобрекчии; *3* — афировые андезитовые порфириты; *4* — основные и второстепенные разрывные нарушения; *5* — рудные тела и их первичный ореол в контуре $3\cdot10^{-3}$ % Hg; *6* — подземные выработки *(а)* и скважины *(б)*

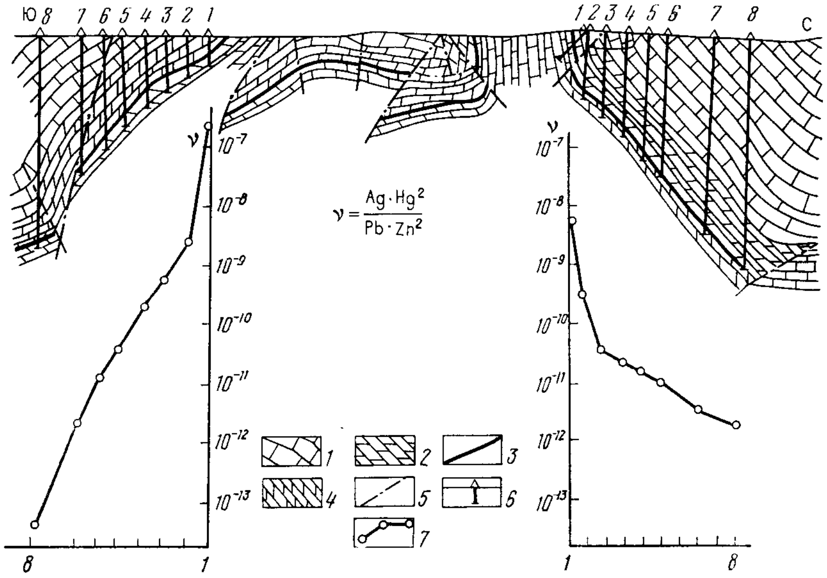


Рис. 73. Графики изменения показателя геохимической зональности с глубиной. Миргалимсайское месторождение.

1 — известняки C_1t_1; *2* — известняки D_3fm_{5-8}; *3* — рудный горизонт D_3fm_4; *4* — известняки D_3fm_{1-3}; *5* — тектонические нарушения; *6* — разведочные скважины; *7* — график $\nu_z = f(z)$

7 Заказ № 405

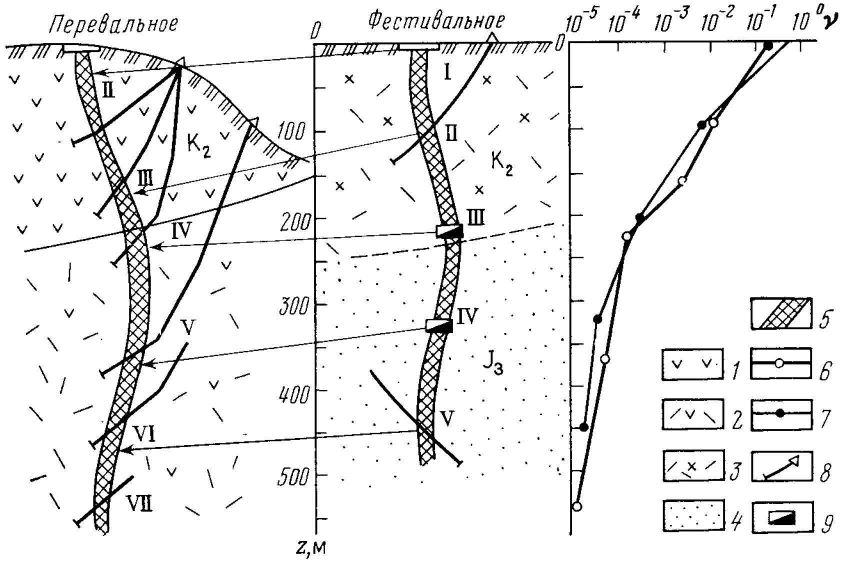


Рис. 74. Геологические разрезы двух оловорудных месторождений и графики общего для них геохимического показателя зональности $\nu_z = \frac{Bi^2 \cdot Ag}{Sn^2 \cdot W}$.

1 — порфириты; *2* — плагиоклазовые порфириты и их туфы; *3* — эффузивно-осадочные породы нижнего мела; *4* — верхнеюрская песчано-сланцевая толща; *5* — рудная зона; *6, 7* — графики ν_z для месторождения Перевальное (*6*) и Фестивальное (*7*); *8* — скважины; *9* — горные выработки

ляется программа «Ню-2». По числу исследованных разведочных профилей и опробованных уровней оруденения в составе выявленных показателей случайно монотонных не ожидалось. По каждому из этих детально разведанных месторождений были выбраны 8—10 различных ν, которые затем применялись для оценки генетически однотипных проявлений рудной минерализации — геохимических аномалий, выявляемых при поисках.

Зональность Терлигхайского месторождения (см. рис. 72) исследовалась в целом, без выделения отдельных кварцево-киноварных тел, что оправдало себя. Генезис стратиформных месторождений считается спорным: согласно одной точке зрения, они являются первично-осадочными, согласно другой, — гидротермальными. Геохимическая зональность Миргалимсайского полиметаллического месторождения одинаково проявляется в двух крыльях антиклинали (см. рис. 73), что указывает на возможный послескладчатый характер рудообразования и, следовательно, на его эпигенетическую природу. Два оловорудных месторождения, показанные на рис. 74, принадлежат к одному генетическому типу силикатно-сульфидной формации, расстояние между ними по прямой около 40 км. Коэффициент подобия ϰ этих двух месторождений около 1,0.

Следует ли всегда ожидать существования монотонных показателей зональности месторождений в силу последовательного отложения элементов при рудообразовании? Ответ на этот вопрос, несомненно, будет отрицательным. Одна из причин нарушения их монотонности — многоэтажное, нередко кулисообразное размещение слепых рудных тел по глубине. В результате ряды зонального отложения элементов могут неоднократно повторяться, и подрудный ореол одного рудного тела может совмещаться с надрудным ореолом другого. Этот важный признак должен учитываться во всех случаях.

Другая причина — наличие «центриклинальной» зональности, симметричной относительно средней части рудной залежи. Такую зональность можно ожидать у вулканогенно-осадочных месторождений, а также по простиранию (ν_y) многих жильных и пластовых эндогенных месторождений, от «горячей» центральной части к их «холодным» концам. Отчетливую центриклинальную зональность медноколчеданного месторождения «50 лет Октября» (Северные Мугоджары) выявил А. А. Матвеев.

Такую же роль играет пологое склонение рудных тел, в результате которого по некоторым разведочным профилям зональность отсутствует или приобретает обратный характер (рис. 75). Именно такая зональность была обнаружена при

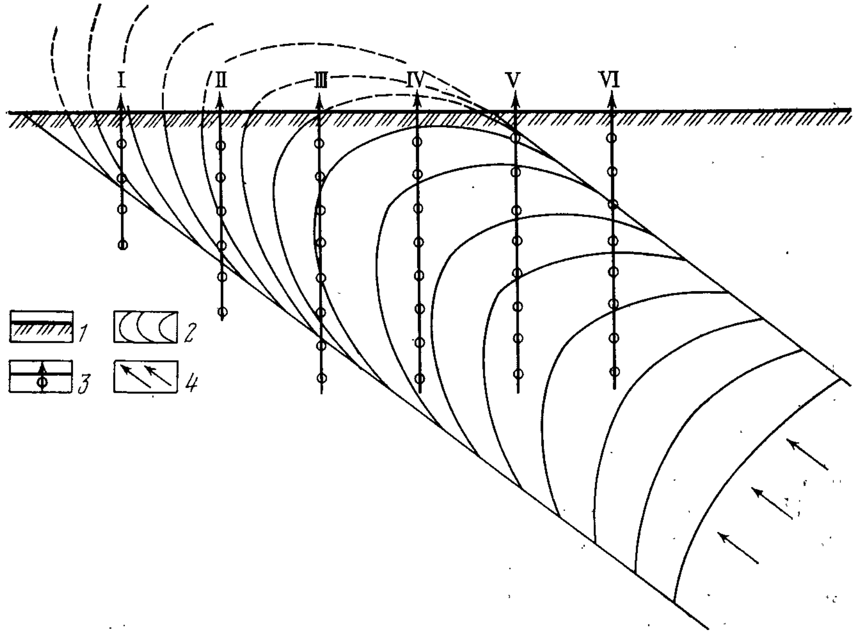


Рис. 75. Схема обратной зональности при пологом склонении рудной зоны.

1 — современная поверхность; *2* — условные «изотермы» рудоотложения; *3* — разведочные профили, точки — пересечение плоскости рудной зоны скважинами; *4* — направление движения гидротерм

исследовании меднопорфирового месторождения Коксай (Южный Казахстан). Только в первом приближении изолинии условной «температуры» рудоотложения, отражением которой являются линии изо-ν, могут в плоскости рудной зоны предполагаться параллельными дневной поверхности и между собой. Слово «температура» умышленно взято в кавычки и означает комплекс физико-химических условий, изменяющихся с глубиной. Вторым приближением может служить картина «изотерм», показанная на рис. 75. В более общем случае линии изо-ν в плоскости рудной зоны имеют сложный криволинейный характер, замыкаясь вокруг отдельных «холодных» и более «горячих» блоков.

Выявление связи между распределением полезных компонентов оруденения и численными значениями ν имеет важное практическое значение, в частности, для прогноза рудных столбов и «бонанц» на месторождениях золота. Несомненно, что в природных условиях различные причины, в том числе многостадийный характер оруденения, осложняют зональность эндогенных месторождений.

4.4. РЕШЕНИЕ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ ЗАДАЧ

Конечная цель исследований первичных ореолов и зональности месторождений — обнаружение новых рудных тел и прогноз оруденения на глубину. Высокой эффективности при решении этих задач достиг С. В. Григорян в рудных районах Карамазара (ТаджССР). Из 37 геохимических аномалий, рекомендованных им к разведке, слепое промышленное оруденение было обнаружено горно-буровыми работами в 31 случае (84 %). Из 15 разведывавшихся аномалий, оцененных как бесперспективные, ни в одном случае промышленных руд встречено не было. Слепые рудные тела были открыты по данным С. В. Григоряна на глубоких горизонтах скарново-полиметаллического месторождения Гарпенберг в Швеции [5].

На всех стадиях поисков и разведки универсальное значение имеет оценка по геохимическим данным одиночных рудных пересечений путем их перевода в метрику эталонных месторождений. Это особенно важно при оценке непромышленного оруденения, когда решается вопрос о его принадлежности к надрудным, убогим центральным или подрудным интервалам рудной зоны (см. рис. 55).

Не менее важной является оценка в метрике эталонного месторождения и промышленного оруденения на горизонте его обнаружения поисковыми скважинами или на современной поверхности, в том числе по вторичным остаточным ореолам рассеяния. В последнем случае задача сводится к оценке уровня эрозионного среза месторождения, в числе других признаков определяющего его прогнозные ресурсы (см. раздел 6.2.4).

Оценка («таксирование») уровня оруденения проводится по

показателям зональности ν_z генетически однотипного эталонного месторождения. Для этого выбранные монотонно изменяющиеся показатели зональности изображаются графически в координатах [$\log \nu$, z], как это показано на рис. 64, 72—74. По этим графикам, как по градуировкам, численные величины ν_i таксируемого сечения переводятся в значения z_i. Наиболее удобно величины z эталона выражать в шкале 0,0—1,0. Если для этого нет достаточных данных, отсчет глубины ведется в относительных или абсолютных отметках или в «уровнях» (горизонтах) эталонного месторождения. Те же оценки могут быть получены аналитически по формуле подобия треугольников:

$$z_i = a + (b - a)\,\frac{\lg(\nu_a/\nu_i)}{\lg(\nu_a/\nu_b)}, \tag{104}$$

где a и b — отметки (или номера) двух уровней эталонного месторождения, между которыми (или вблизи которых) лежит z_i (рис. 76).

Недостаточно уровень оруденения определять по величине одного ν — при этом остаются неизвестными сходимость и доверительные пределы оценок. Определения следует вести по 8—10 разным ν_i с оценкой среднего арифметического z и стандартного отклонения через размах значений $s = \beta_n(z_{max} - z_{min})$, где β_n — табличный множитель, зависящий от числа определений [42]. Оценки уровней оруденения представляются в значениях $\bar{z} \pm s/\sqrt{n}$, где n — число использованных ν. Величины доверительных пределов $\pm s/\sqrt{n}$ характеризуют надежность оценок и служат одним из критериев генетической близости оцениваемого оруденения к эталонному месторождению. Оценки считаются удовлетворительными, если они лежат в пределах ±50 м, при бóльших доверительных пределах целесообразно пересмотреть выбор эталона.

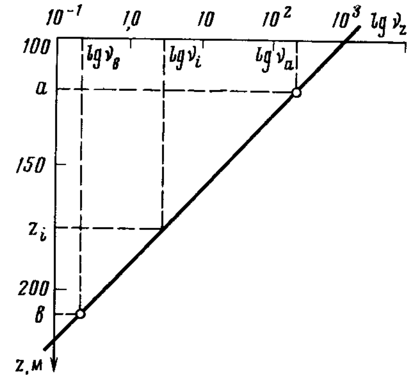


Рис. 76. Схема оценки уровня оруденения z_i по величине ν_i в метрике эталонного месторождения

Метод оценки ожидаемых на глубине ресурсов металла по характеристикам надрудных первичных ореолов впервые предложил В. Л. Барсуков для оловорудных месторождений Дальнего Востока. В основе его лежит анализ первичных ореолов легколетучих элементов, освобождающихся при распаде комплексных соединений, в форме которых происходит перенос рудных элементов при гидротер-

мальном рудообразовании. В общем случае между надрудными ореолами этих аддендов и количеством металла, отложившегося на глубине, существует прямая зависимость. При формировании оловорудных месторождений перенос олова гидротермальными растворами происходит в форме фтор-гидроксильных комплексов, гидролиз которых при изменении кислотно-щелочных условий идет по реакции

$$[Sn(OH)_2F_4]^{2-} + 2OH^- \rightarrow SnO_2 + 2H_2O + 4F^-.$$

Освобождающийся при этом фтор-ион входит в состав надрудных околожильных пород в содержаниях, зависящих от количества касситерита, отложившегося на глубине [5].

В. Л. Барсуков предложил оценивать прогнозные ресурсы олова по величине отношения между средними содержаниями фтора в надрудном интервале жильного выполнения (F_p) и в околорудном ореоле (F_{op}) с помощью соответствующего уравнения регрессии. Эти зависимости с переменным успехом были использованы в практике работ и вошли в действующую Инструкцию [21]. Этот весьма перспективный метод оценки прогнозных ресурсов Sn, а также W, Be и некоторых других металлов по надрудным первичным ореолам легколетучих элементов еще нуждается в доработке.

Другой вариант решения этой задачи рассчитан на более ограниченный интервал надрудных ореолов — от горизонта, на котором основной рудный элемент обнаруживается в заведомо аномальных содержаниях, до горизонта промышленных руд. В принятой метрике это отвечает интервалу $0{,}0<z<0{,}2$. Начиная с $z \geqslant 0{,}2$, оценка ресурсов ведется по параметрам рудного тела. Надрудный первичный ореол, например, свинцового месторождения можно характеризовать последовательными уровнями, схематически показанными на рис. 77. На уровне 0,02 очень маленькую по размерам и по продуктивности литохимическую аномалию образует только свинец. На уровне 0,07 к нему присоединяется серебро, а на уровне 0,11 — медь, и выявленные размеры аномалий последовательно возрастают. Более раннее появление первичного ореола свинца по сравнению с ореолом серебра не означает, что серебро отлагалось ниже свинца, и судить о поведении элементов по выявленным размерам их геохимических аномалий в любом случае недопустимо. Такая последовательность появления ореолов двух элементов объясняется тем, что это свинцовое месторождение, и в количественном отношении свинец существенно преобладает над серебром.

Эта несложная модель только напоминает, что эффективные размеры литохимических аномалий, содержания и продуктивности элементов уже в надрудном ореоле могут изменяться различным образом — возрастать, оставаться постоянными и убывать с глубиной. Закономерности распределения в контуре модели оруденения основного рудного элемента более подробно

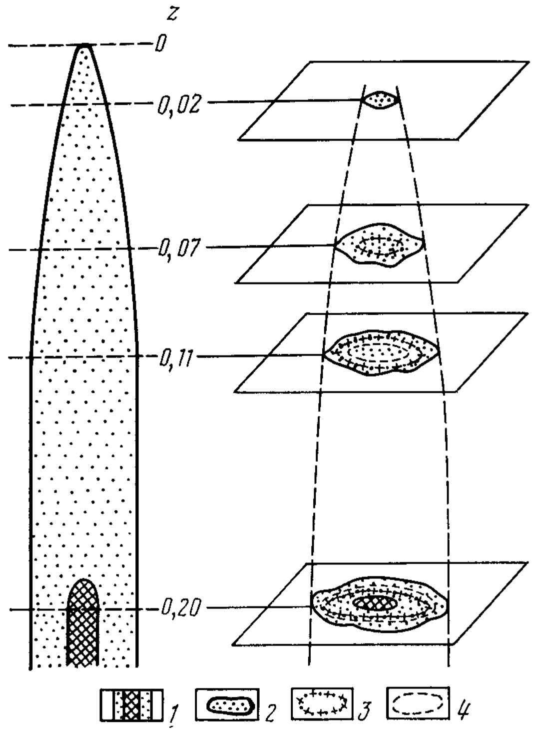


Рис. 77. Модель уровней эрозионного среза.

1 — вертикальный разрез рудного тела и его первичного ореола; первичные ореолы в плане: *2* — свинца; *3* — серебра; *4* — меди

характеризует рис. 78. Здесь на вертикальном разрезе рудной линзы показаны: уже обсуждавшийся ранее график содержаний рудного элемента $\lg C_z = f(z)$, график изменения с глубиной площади литохимической аномалии S_z и график одного из геохимических показателей зональности ν_z, по условию не имеющего в своем составе основного рудного элемента.

Совместное рассмотрение этих данных позволяет выделить в пределах рудной зоны интервалы: надрудный, в котором линейная M_p и площадная P_p продуктивности оруденения от уровня к уровню возрастают; рудные, в которых M_p остается сравнительно постоянной; и подрудный, в котором продуктивность убывает, вплоть до полной выклинки оруденения. Поскольку величина показателя зональности ν_z монотонно убывает с глубиной, в надрудном интервале между M_p и ν_z существует отрицательная корреляция, в подрудном — положительная, в наиболее продуктивной части рудной зоны — между M_p и ν_z — корреляция отсутствует. При геохимическом опробовании конкретного месторождения по серии разведочных профилей эти корреляционные зависимости могут служить для диагностики соответствующих интервалов рудной зоны.

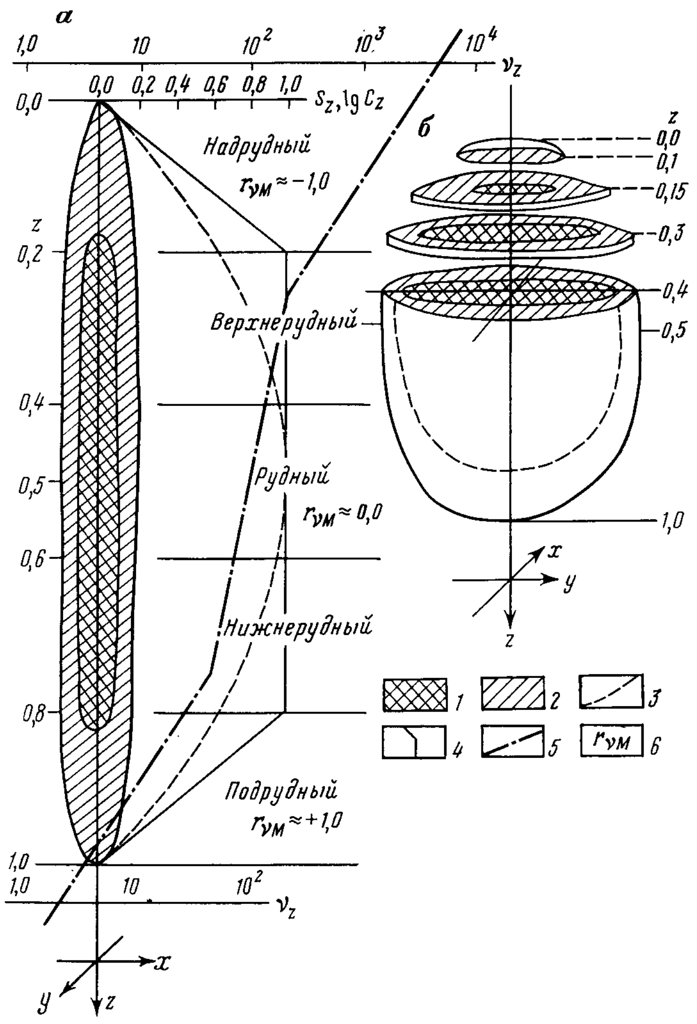


Рис. 78. Модель рудной **линзы:**

а — вертикальный разрез; *б* — различные уровни срезов. *1* — рудное тело; *2* — первичный ореол; *3* — график площади литохимической аномалии S_z; *4* — график содержаний рудного элемента $\lg \bar{C}$; *5* — график ν_z; *6* — коэффициенты корреляции между ν_z и M_z в различных интервалах рудной зоны

В правой части рис. 78 показаны различные срезы рудной линзы, начиная с надрудных уровней 0,1—0,15. Очевидно, что обнаружение слепого рудного тела при геохимических поисках возможно и на других, более высоких уровнях первичного ореола с различными весьма малыми продуктивностями $P_р$ (в м^2 %). Судить о прогнозных ресурсах металла на глубине по величине этой продуктивности согласно формуле (87)

можно только путем ее пересчета на уровень 0,2 с помощью поправочного множителя, заведомо большего единицы.

Прогнозные ресурсы металла Q_H^* в слепых рудных телах по продуктивности $P_р$ их надрудных ореолов следует оценивать согласно зависимостям

$$P_р^* = \eta P_р; \qquad (105)$$

$$Q_H^* = \frac{1}{40} P_р^* H \alpha, \qquad (106)$$

где $P_р^*$ — исправленная продуктивность; $\eta_i = f(z_i) > 1{,}0$ (z_i — конкретный уровень надрудного ореола, на котором определена $P_р$); H — протяженность рудного интервала от $z=0{,}2$ до $z=0{,}8$; $\alpha < 1{,}0$ — поправочный множитель, учитывающий долю забалансовых руд. В отличие от коэффициента $\eta > 1{,}0$, зависящего от $z < 0{,}2$, поправочный множитель α в формуле (106) зависит в частности от общих запасов металла Q_H, сосредоточенных в объекте.

Опыт показывает, что выявленная «ширина» первичного ореола при постоянных бортовом и фоновом содержании определяется свойствами рудного элемента и рудовмещающих пород и не зависит от размеров рудного тела. В итоге с возрастанием общих запасов металла Q_H относительное его количество, сосредоточенное в первичном ореоле, снижается и поправочный множитель α стремится к единице. Справедливость такой зависимости α от Q_H можно показать на простейшем примере сферической залежи. Обозначая радиус рудного тела r, среднее содержание металла в руде $\bar{C}_р$, принимая эквивалентную мощность первичного ореола за 1,0 и среднее содержание металла в ореоле 0,2 $C_р$, имеем

$$\alpha = \frac{r^3}{0{,}8r^3 + 0{,}2\,(r+1)^3}.$$

Придавая r различные значения найдем соответствующие величины α (табл. 17). По мере увеличения размеров залежей запасы металла в первичном ореоле растут, но их относительная доля в общих (геохимических) запасах снижается.

Более сложно обоснование численных значений множителя $\eta_i > 1{,}0$. Установление соответствующих функциональных зависимостей является задачей ближайшего будущего. Здесь мы ограничимся рассмотрением частных значений η_i, предложенных для пересчета продуктивности надрудных первичных ореолов на уровень промышленных горизонтов ($z=0{,}2$) для оловянных месторождений Кавалеровского района (Приморский край).

Оловорудные месторождения этого района принадлежат к сульфидно-касситеритовой формации, их рудные тела представлены крутопадающими жилами и минерализованными зонами

Таблица 17

Поправочные множители α для учета забалансовых руд. Сферическая залежь (модель)

Объект	r	Условные запасы металла: Всего $Q_н$	в том числе: в руде	в том числе: в первичном ореоле	α
Рудопроявление	0,3	0,461	(0,027)	0,434	0,059
Месторождение:					
мелкое	1,0	2,4	1,0	1,4	0,417
среднее	2,15	14,26	10,0	4,26	0,701
крупное	4,64	115,88	100,0	15,88	0,863
уникальное	10,0	1067,4	1000,0	67,4	0,937

нами дробления. Оруденение характеризуется четкой вертикальной зональностью, отражением которой служат монотонные убывающие с глубиной геохимические показатели зональности типа $\frac{Pb}{Sn}$, $\frac{As \cdot Zn}{Sn^2}$, $\frac{Sb \cdot Cu \cdot Pb}{Sn^3}$, общие для главнейших месторождений района. На рис. 79, *а, б, в* показана модель верхнего интервала рудной зоны с теоретическими графиками средних содержаний C_z трех рудных элементов Sn, Pb, Sb и отношений между ними ν_z. В отличие от возрастающих содержаний Sn, средние содержания Pb на всем протяжении надрудного интервала имеют устойчивые значения, а содержания Sb в том же интервале $0{,}0 \leqslant z \leqslant 0{,}2$ непрерывно падают с глубиной. Убывание с глубиной величины геохимического показателя первого порядка $\nu = Pb/Sn$ в надрудном интервале обязано только возрастанию средних содержаний (продуктивностей) Sn и, следовательно, является мерой поправочного множителя η. Ниже отметки $z=0{,}2$ в условиях устойчивых содержаний Sn продолжающееся убывание численных значений $\nu = Pb/Sn$ обязано начавшемуся падению с глубиной средних содержаний Pb. Более быстрое падение с глубиной величины отношений Sb/Sn в надрудном интервале обязано сочетанию роста средних содержаний Sn с падением содержаний Sb, и мерой поправочного множителя η служить не может.

На рис. 79, *г* показаны реальные графики изменения с глубиной величин показателей Pb/Sn и Sb/Sn для Кавалеровского рудного района, достаточно близко повторяющие модельные построения (см. рис. 79, *в*). С учетом этого по реальному графику $\nu = Pb/Sn$ исходя из зависимости: $\eta = \nu_{z<0,2}/\nu_{z=0,2}$ были найдены значения $\eta = f(z)$, график которых показан на рис. 80. При уровнях эрозионного среза, близких к нулю, значения η столь быстро возрастают, что их оценка становится неустойчивой. Поэтому применение поправочного множителя и оценка прогнозных ресурсов металла по формулам (105) и (106) при эрозион-

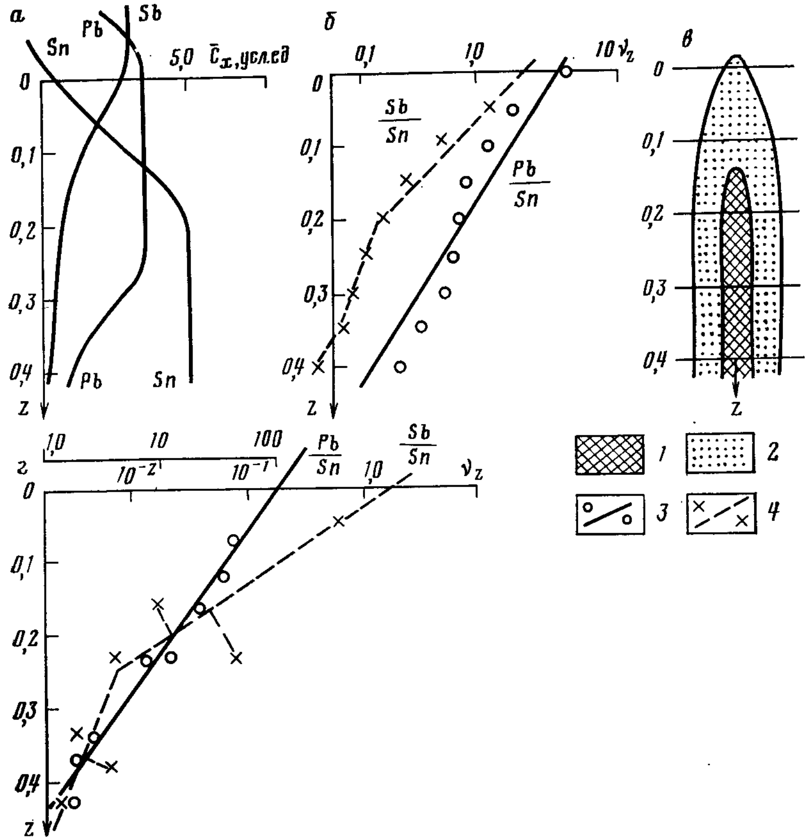


Рис. 79. Графики содержаний Sn, Pb, Sb и отношений между ними в надрудном и верхнерудном интервалах оловянных месторождений. *По А. П. Соловову и П. А. Куршеву:*

а, б, в — модель; *г* — реальные данные по Кавалеровскому району. *1* — рудное тело; *2* — первичный ореол; *3—4* — вычисленные значения и графики Pb/Sn *(3)* и Sb/Sn *(4)*

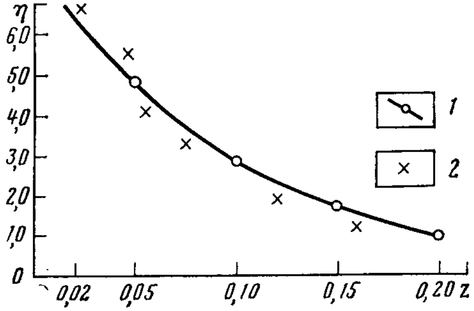


Рис. 80. График для оценки поправочного множителя $\eta > 1{,}0$ при малой глубине эрозионного среза оловорудных проявлений Кавалеровского района. *По А. П. Соловову и П. А. Куршеву.*

1 — осевой график $\eta = f(z)$; *2* — относительные линейные продуктивности M_z по простиранию Арсеньевского месторождения для шести значений z от 0,02 до 0,16

ном срезе объектов $\bar{z}<0,02$ не рекомендуется, при $z \geqslant 0,2$ множитель η равен 1,0.

Дополнительно на рис. 80 нанесены значения η, рассчитанные по величинам линейных продуктивностей M вторичных ореолов рассеяния Sn Арсеньевского месторождения для шести разных значений z. Для месторождений иных генетических типов и различных металлов возможно отыскание других сочетаний рудных элементов для оценок η рассмотренным методом.

Оценка ресурсов металла, ожидаемых ниже горизонта $\bar{z}>0,2$, ведется с учетом остающейся части рудной залежи H, согласно простой пропорции:

$$H_i : H_{\text{полн}} = (0,8 - \bar{z}_i) : (0,8 - 0,2) \quad \text{или}$$

$$H_i = H_{\text{полн}} \frac{0,8 - \bar{z}}{0,6} \qquad (107)$$

Здесь z может отвечать уровню эрозионного среза оруденения или глубине, достигнутой разведкой, ниже которой по данным геохимического опробования этого горизонта оцениваются резервы оруденения. При $z_i \geqslant 0,8$ прогнозные ресурсы равны нулю. Полная протяженность рудного интервала $H_{\text{полн}}$ принимается из опыта или путем модельных построений на принципе геометрического подобия генетически однотипных месторождений различной крупности. Модель оруденения должна выбираться по признаку ближайшей аналогии с формой и элементами залегания ожидаемых рудных тел.

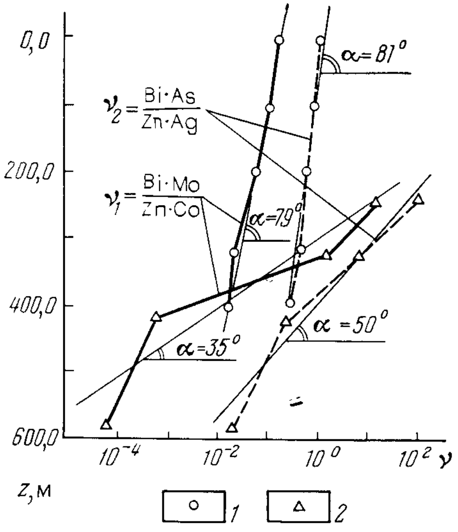


Рис. 81. Графики для оценки коэффициента подобия между двумя меднопорфировымн месторождениями. *По А. А. Матвееву.*

1 — Коунрад; 2 — Сокуркой

Сравнительную оценку генетически однотипных месторождений можно обосновать исходя из их геометрического подобия. Такой пример дает геохимическое сопоставление двух меднопорфировых месторождений Северного Прибалхашья. Первое из них, хорошо известное месторождение Коунрад, второе — Сокуркой — открыто вскоре после Коунрада поблизости от него и за истекшие полвека неоднократно безрезультатно разведывалось. Исследование первичной зональности этих месторождений, проведенное в последние годы, выявило их полное геохимическое сходство. Ряды зонального отложения 12 рудных элементов Коунрада и Сокуркоя имеют ранговый коэффициент корреляции 0,65 (при $r_5\,\% = 0,58$), эти месторождения имеют много общих показателей зональности ν, монотонно изменяющихся с глубиной. Графики одноименных показателей геохимической зональности для Коунрада и Сокуркоя существенно различаются по наклону к оси абсцисс, что хорошо видно на рис. 81. По соотношениям тангенсов углов наклона графиков семи общих показателей зональности согласно зависимости (95) была получена оценка коэффициента геометрического подобия между Сокуркоем и Коунрадом $\varkappa = 0,27 \cdot 1,07^{\pm 1}$. Отсюда, согласно (97), полные запасы металла месторождений Сокуркоя $Q_С$ и Коунрада $Q_К$ находятся в соотношениях $Q_С = \varkappa^3 \cdot Q_К = 0,02\ Q_К$. Рассчитывать на положительные результаты разведки Сокуркоя, очевидно, нельзя. Рудные залежи меднопорфировых месторождений часто имеют форму опрокинутой чаши с безрудным ядром. В данном случае оценка была проведена на принципе подобия, без обращения к форме рудных тел.

Глава 3

ВТОРИЧНЫЕ ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

3.1. ВЫВЕТРИВАНИЕ И ДЕНУДАЦИЯ

Горные породы, слагающие земную кору, подвергаются денудации в результате их предварительного выветривания. Этот процесс приводит к появлению рыхлых (дисперсных) новообразований зоны гипергенеза, существенно отличных по своим физическим свойствам от исходных коренных пород.

Из числа главнейших породообразующих минералов высокой устойчивостью к химическому выветриванию обладает только кварц SiO_2. Химическое выветривание первичных алюмо- и ферросиликатов широко проявлено их переходом во вторичные глинистые минералы, окислы и гидроокислы. В результате гидролиза первичный алюмосиликат теряет катионы металлов (K, Na, Ca, Mg...), которые в виде углекислых, галоидных, сернокислых и других солей растворяются и уносятся водами. На этой стадии выветривание ведет к образованию гидрослюд и глинистых минералов группы монтмориллонита $Al_4Si_8O_{16}[OH]_{12}\cdot nH_2O$, относительно устойчивых в щелочной и нейтральной среде ($pH \geqslant 7$). По мере выноса оснований и увеличения кислотности среды ($pH < 7$) монтмориллонит переходит в галлуазит, а последний, при потере воды, — в каолинит $Al_4Si_4O_{10}[OH]_8$, который в качестве конечных продуктов дает оксид алюминия $Al(OH)_3$ и кремнезем. Освобождающийся при этих реакциях коллоидный кремнезем в дальнейшем частью выносится водами, а частью осаждается в виде твердых аморфных осадков (гелей) состава $SiO_2\cdot nH_2O$. Обезвоживаясь и кристаллизуясь, гель кремнекислоты превращается в обыкновенный кварц. Вторичный кварц химически так же устойчив, как первичный кварц изверженных пород. Незначительная часть гидроксида алюминия выносится в растворе, а преобладающая часть осаждается в виде гелей $Al_2O_3\cdot nH_2O$. Выветривание ферросиликатов в конечном счете дает кремнезем и соответственно устойчивые гидроксиды железа $Fe_2O_3\cdot nH_2O$ — гётит и лимонит. Часть коллоидного гидроксида железа остается в растворе, вступая в различные минеральные и органические соединения, или выносится водами. Описанная схема химического выветривания силикатов указывает направление процесса, который в зависимости от местных условий развивается в полном объеме или только частично. Для наиболее полного завершения процесса химического выветривания требуется огромное геологическое время, и потому

значительные массы неустойчивых первичных породообразующих и вторичных глинистых минералов нередко переносятся к базису денудации еще до перевода их в состояние свободных окислов.

Б. Б. Полынов выделил четыре стадии выветривания, характеризующие единый протекающий во времени непрерывный процесс гипергенеза. Первая стадия характеризуется преобладающей ролью физических факторов выветривания с образованием крупнообломочных и мелкозернистых продуктов механического распада массивных горных пород. В условиях сурового климата и активной денудации современное выветривание нередко ограничивается этой первой стадией. Вторая стадия характеризуется щелочной реакцией среды за счет извлечения в раствор оснований при гидролизе минералов. На этой стадии образуются вторичные минералы в результате окисления, гидратации, гидролиза и карбонатизации первичных минералов. Среди вторичных алюмосиликатов на этой стадии преобладают минералы группы монтмориллонита и нонтронит. При относительном избытке в породах кальция в продуктах выветривания происходит накопление карбоната кальция, нередко образующего корку на обломках массивных пород, Б. Б. Полынов именует эту стадию «обызвесткованной или насыщенной сиаллитной корой выветривания»; наибольшее распространение она имеет в условиях умеренного климата при выветривании изверженных и метаморфических пород. В горных районах современные рыхлые образования на склонах часто относятся именно к этому типу.

Третья стадия — остаточной ненасыщенной сиаллитной коры выветривания — характеризуется дальнейшим выносом из продуктов выветривания щелочных и щелочноземельных элементов, вследствие чего реакция среды становится кислой. В этой обстановке среди вторичных алюмосиликатов преобладают галлуазит и каолинит. Развитие этой стадии выветривания имеет место в условиях замедленной денудации и относительно более обильного увлажнения. В четвертой стадии образуется остаточная аллитная кора выветривания, характеризуемая накоплением окислов кремния, железа и алюминия. Развитие ее определяется сочетанием активного химического выветривания с замедленной денудацией в условиях жаркого и влажного климата. В современных условиях на территории СССР развитие аллитной коры выветривания не имеет места и наличие ее обнаруживается только за счет местной сохранности древних кор выветривания, обязанных климатическим эпохам прошлого. Ближе всего к аллитному типу выветривания приближаются красноземы влажных субтропиков Закавказья (район г. Батуми), окраска которых обязана накоплению в них гидроокислов железа.

Важнейшим результатом выветривания является возникновение в зоне гипергенеза коллоидно-дисперсных образований,

т. е. частиц диаметром $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$ мкм. При таком размере необычайно возрастает их удельная поверхность, соответственно чему вещество приобретает новые свойства, связанные с электрическим зарядом частиц и действием поверхностных сил. Коллоидно-дисперсные образования зоны гипергенеза обязаны механическому раздроблению горных пород при выветривании, химическим превращениям, протекающим в зоне выветривания, и разложению органических остатков. Наличие электрического заряда у коллоидных частиц определяет сорбцию ими противоположно заряженных ионов из окружающих растворов. В условиях водной среды, характерной для зоны гипергенеза, глинистые и органические коллоиды обладают отрицательным электрическим зарядом и сорбируют катионы металлов; этими же свойствами обладают коллоиды SiO_2 и MnO_2. Положительными зарядами обладают коллоиды $Fe(OH)_3$ и $Al(OH)_3$. Глинистые минералы обладают различной емкостью поглощения, она максимальна у моитмориллонитов и минимальна у каолинитов.

Образование слоя выветрелых пород облегчает денудацию и одновременно затрудняет дальнейший доступ агентов выветривания к свежим, неизмененным коренным породам. Удаление процессами денудации выветрелого слоя активизирует выветривание, что в свою очередь создает условия для усиления денудации. В итоге между выветриванием и денудацией устанавливается подвижное равновесие, определяющее мощность продуктов выветривания в области положительных форм рельефа. Подвижное (динамическое) равновесие не исключает поступательного развития, в силу которого равновесие сдвигается в ту или иную сторону. Если преобладающую роль приобретает денудация, мощность современных продуктов выветривания h для новых условий равновесия уменьшается. При замедленной денудации и, следовательно, более длительном выветриваиии равновесие будет достигнуто при бо́льших значениях h.

Время T, характеризующее продолжительность пребывания в зоне выветривания элементарного слоя рыхлых образований, находящегося на глубине $z<h$ от дневной поверхности, будет определяться линейной зависимостью

$$T = \frac{h - z}{\Delta h}. \qquad (50)$$

Верхний горизонт рыхлой толщи ($z=0$), ранее других вступивший в зону выветривания, будет характеризоваться наибольшей продолжительностью времени участия в процессе

$$T_0 = T_{max} = \frac{h}{\Delta h}. \qquad (51)$$

Нижнему горизонту на глубине h, т. е. на границе свежих, неизмененных пород будет соответствовать $T_h=0$, поскольку процессы выветривания еще только достигли этой глубины. При установившемся процессе наблюдаемая картина от времени не зависит и T_z является параметром, характеризующим местные условия. Можно приближенно оценить порядок времени T_0 от начала выветривания произвольного слоя коренных пород до момента удаления его продуктов выветривания силами денудации. Исходя, например, из средней мощности слоя денудации горного склона $\Delta h=0{,}25$ мм/год и обычной для этих условий мощности глинисто-щебенистых образований $h=1{,}5$ м, имеем $T_0=\frac{h}{\Delta h}=6000$ лет. Для сравнения укажем, что по данным В. П. Петрова, формирование древней каолинитовой коры выветривания на Урале потребовало порядка 0,5—2,0 млн. лет, характеризуя условия выравненного рельефа. Частое наличие на горных склонах только фрагментарных и грубоскелетных почв указывает на высокую скорость денудации.

Выветривание и денудация ведут к появлению на поверхности суши различных по типу и мощности рыхлых образований, развивающихся на месте за счет подстилающих горных пород. Иное происхождение имеют разнообразные р ы х л ы е (или более плотные) о т л о ж е н и я — перемещенные продукты выветривания, перекрывающие коренные породы в пониженных участках. Эффективность литохимических поисков рудных месторождений по их вторичным ореолам рассеяния в основном зависит от генезиса рыхлых пород — их взаимоотношений с породами субстрата.

В условиях выровненного рельефа и в начальной стадии выветривания образуется элювий — оставшиеся на месте своего образования продукты выветривания коренных пород. С момента образования первого обломка на поверхности плотной горной породы в результате ее физического выветривания число обломочных частиц будет непрерывно возрастать, а их средний размер уменьшаться. Вследствие необратимости этого процесса элювию обычно свойственна наименьшая крупность частиц вблизи дневной поверхности. По вертикальному разрезу элювий постепенно переходит в плотную коренную породу (рис. 25).

Этой же закономерности в общем случае подчинено постепенное разрушение и образование обломков первоначально монолитного рудного тела. Иногда мелкозернистый материал вследствие проваливания мелких частиц между крупными обломками и переноса атмосферными осадками или выдувания ветром располагается на некоторой глубине. В зоне холодного и умеренного климата мощность элювия обычно не превышает нескольких метров, а в условиях влажного и жаркого климата — может достигать 100 м. По своему составу элювий отражает состав коренных пород и наличие в них оруденения

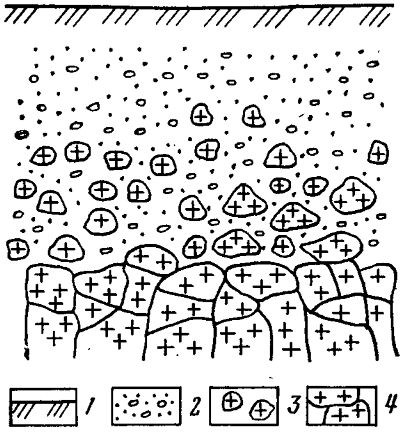


Рис. 25. Вертикальный разрез элювия.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — песчано-глинистые образования; 3 — обломки коренных пород; 4 — коренные породы

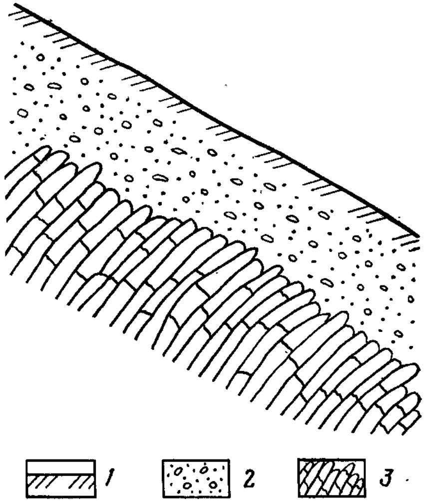


Рис. 26. Вертикальный разрез элювио-делювия.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — песчано-глинистые образования со щебенкой; 3 — коренные породы в начальной стадии выветривания

с теми изменениями, которые вносят химическое выветривание и биогенные процессы.

Термином «делювий» принято обозначать рыхлые новообразования любого петрографического состава, покрывающие склоны возвышенностей и представляющие собой продукты выветривания коренных пород, перемещенные действием силы тяжести и атмосферных осадков. Делювий, образуя сплошной покров у основания склона, достигает водораздела, где сливается с близким к нему по составу элювием. В результате рыхлые образования покрывают всю местность, образуя слабо волнистый элювио-делювиальный покров. При литохимических поисках месторождений по их вторичным ореолам рассеяния чаще всего приходится иметь дело именно с э л ю в и о-д е л ю в и а л ь н ы м и образованиями — слабо перемещенными продуктами выветривания, по своему составу и местоположению еще сохраняющими отчетливую связь с материнскими коренными породами. Мощность элювио-делювиальных образований в большой степени зависит от скорости денудации, обычно колеблясь от 0,5—2 до 10—12 м, редко более. Состав элювио-делювия в данной точке отражает состав коренных пород, расположенных гипсометрически выше по склону. По вертикальному разрезу элювио-делювиальные образования на глубине сменяются элювием, в свою очередь переходящим в плотную коренную породу (рис. 26). В особый генетический тип должны быть

выделены солифлюкционные образования, развивающиеся в условиях устойчивой мерзлоты и арктического климата. Погребая под собой коренные горные породы, пролювиальные, аллювиальные и ледниковые отложения по своему составу и характеру находятся с ними в сложной генетической связи. Не имеют прямой генетической связи с непосредственно подстилающими их породами различные эоловые, озерные, морские и вулканогенные отложения, образующиеся в условиях, когда денудация уступает место осадконакоплению. Однако в благоприятных условиях вторичные ореолы рассеяния месторождений полезных ископаемых, залегающих в породах фундамента, могут проявляться на поверхности и в составе перекрывающих дальнеприносных отложений ограниченной мощности за счет эпигенетических процессов, которые будут рассмотрены ниже.

3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

В составе элювио-делювиальных образований рудоносных пород выветривание непрерывно создает, а денудация непрерывно обновляет литохимические ореолы рассеяния месторождений, рудные тела или первичные ореолы которых выведены на уровень денудационного среза (см. рис. 4, уровни *Б—Г*). Этот процесс, стремящийся к регулярному режиму, обеспечивает существование вторичных ореолов рассеяния месторождений в качестве устойчивых геологических образований зоны гипергенеза, подчиняющихся вполне определенным закономерностям. Формируя локальные аномалии гипергенного поля рассеяния в активно денудируемых районах, этот основной процесс образования вторичных литохимических ореолов рассеяния в то же время является не единственным. Вследствие многообразия и сложности процессов рассеяния возникла необходимость составления классификации ореолов рассеяния. Выделяя в составе сложного процесса отдельные, лежащие в его основе простые явления, удается обеспечить их всестороннее и углубленное рассмотрение. Характерные для тех или иных типов вторичных ореолов рассеяния генезис, морфология и количественные параметры определяют их поисковое значение и геологическую интерпретацию. Классификация вторичных ореолов рассеяния была предложена Н. И. Сафроновым еще в 1936 г. [34] и, с небольшими поправками, сохраняется до настоящего времени.

По *фазовому состоянию* вторичные ореолы рассеяния классифицируются на механические, солевые и газовые.

В механическом ореоле рассеяния его минеральные компоненты присутствуют в форме твердых веществ — устойчивых в зоне гипергенеза первичных или вторичных минералов и рудных обломков. Образование механического ореола рассеяния обязано физической дизентеграции рудного тела, потере рудными минералами и обломками связи с монолитом и приобретению ими подвижности. Основными горизонтами развития механических ореолов рассеяния являются современные элювио-делювиальные образования и древние остаточные коры выветривания рудовмещающих толщ. Механические ореолы рассеяния образуют абсолютное большинство рудных месторождений, в первую очередь золота, платины, касситерита, хромита и многих других минералов.

В солевом ореоле рассеяния минеральные компоненты месторождения присутствуют в форме растворенных или сложно связанных с породами водорастворимых соединений. Образование вторичных солевых ореолов обязано движению, диффузии, капиллярному подъему и испарению минерализованных вод, образующихся в результате растворения рудных минералов, чаще всего на стадии их гипергенных изменений. Участвуя в формировании сложных (механических и солевых) ореолов в элювио-делювии, солевое рассеяние может развиваться уже на стадии слепого залегания рудных тел и их первичных ореолов (см. рис. 4, уровень *А*) за счет омывания подземными водами верхних горизонтов оруденения.

В благоприятных условиях солевое рассеяние способно распространяться на перекрывающие дальнеприносные отложения. Компоненты солевого ореола могут усваиваться корневой системой растений, образуя биогеохимические ореолы в живой растительности. Последующая минерализация растительного опада образует биогенную составляющую сложного литохимического ореола. Солевые ореолы рассеяния образуют, в частности, месторождения медноколчеданных руд, плавикового шпата и в той или иной мере все другие типы рудных месторождений.

Образование газовых ореолов рассеяния обязано диффузии и эффузии газовых компонентов месторождений через толщу горных пород к дневной поверхности. Газовые ореолы рассеяния характерны для месторождений радиоактивных руд и развиваются независимо от процессов выветривания или от положения денудационной поверхности по отношению к залежи. Они образуются в результате самопроизвольного радиоактивного распада элементов, при котором выделяются газообразные эманации — радон и торон. Наличие газовых ореолов рассеяния доказано для ртутных месторождений, что связано с высокой упругостью паров ртути уже при обычных температурах земной поверхности [46]. То или иное участие в гипергенном рассеянии рудных месторождений паров свинца, меди, цинка, олова и любых других металлов в виде атомарного газа или, например, в форме более летучих галоидных соединений не подлежит сомнению, но, очевидно, играет подчиненную роль, и техника обнаружения газовых ореолов этих рудных элементов еще находится на стадии разработки. Подвергаясь адсорбции и окклюзии на поверхности частиц рыхлой толщи, газообразные компоненты участвуют в образовании литохимического ореола рассеяния. Таким образом, вторичные литохимические ореолы рассеяния

рудных элементов образуются в основном в твердой фазе, меньшее значение имеет солевое рассеяние и очень малую роль играет рассеяние в газообразном состоянии. Ниже более подробно рассматриваются только вторичные механические и солевые ореолы рассеяния. Собственно газовые ореолы рассеяния рудных месторождений рассматриваются в гл. 5 при изложении методики атмохимических поисков.

Вторичные ореолы в современном элювио-делювии или древней коре выветривания, образованные за счет интервалов рудного тела или его первичного ореола, существовавших в профиле коренных пород до выветривания, именуются **остаточными ореолами** рассеяния. В отличие от них выделяются **наложенные ореолы**, в контурах которых до развития вторичных процессов рассеяния первичная рудная минерализация отсутствовала. Важнейшая особенность вторичных остаточных ореолов рассеяния — это пропорциональность их линейной M, м % и площадной P, м² % продуктивностей тем же параметрам исходного коренного оруденения $M_р$, $P_р$, выражаемая зависимостями (18) и (19). Входящий в эти формулы множитель пропорциональности $k \gtrsim 1{,}0$, зависящий от местных ландшафтно-геохимических условий и свойств конкретного рудного элемента, для этих ореолов именуется коэффициентом остаточной продуктивности.

По признаку доступности для обнаружения различаются **открытые ореолы рассеяния**, т. е. выходящие на современную дневную поверхность, и **закрытые ореолы**, выявляемые только на некоторой глубине от поверхности. Образование закрытых ореолов связано, например, с выносом атмосферными осадками легкоподвижных рудных элементов из верхних горизонтов элювия или с последующим за развитием остаточного ореола рассеяния изменением базиса денудации, приведшим к отложению чехла дальнеприносных пород и переходу остаточного ореола в погребенное состояние. Наличие этого чехла, аллохтонного по отношению к рудовмещающим породам и их корам выветривания, в частном случае может не помешать диффузионному, сорбционному, испарительному и (или) биогенному накоплению рудных элементов у дневной поверхности и привести к образованию открытого наложенного литохимического ореола рассеяния (рис. 27). В отличие от первых двух классификационных признаков, принадлежность ореола рассеяния к закрытому типу имеет не генетический, а только временный технический смысл. При пересмотре перечня определяемых элементов, совершенствовании методики анализа проб или способов математической обработки данных любой «закрытый», ореол рассеяния может перейти в разряд «открытых». Поэтому более строгое определение термина «закрытый ореол рассеяния» требует указания на невозможность его обнаружения на дневной поверхности «с применением существующих технических средств». Каждый из рассмотренных

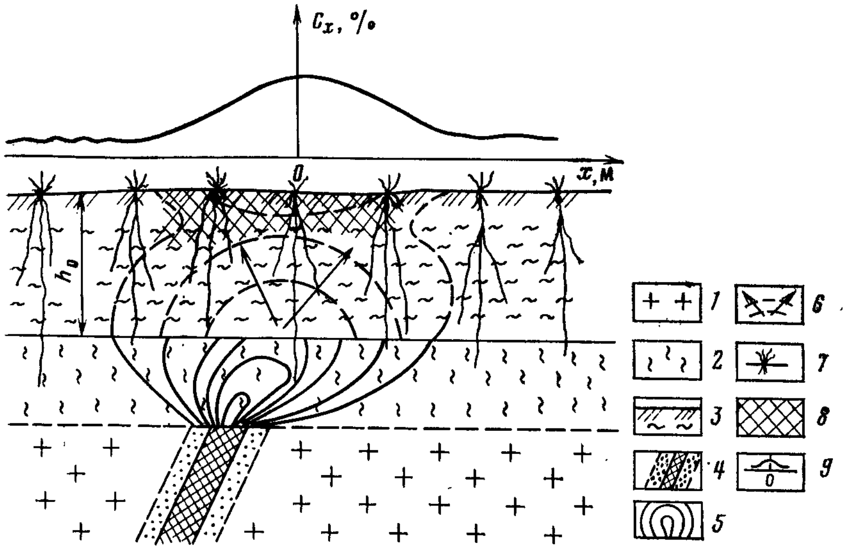


Рис. 27. Схема образования открытого наложенного литохимического ореола рассеяния.

1 — рудовмещающие породы; *2* — древняя кора выветривания; *3* — дальнеприносные отложения мощностью h_0; *4* — рудное тело и его первичный ореол; *5* — погребенный вторичный остаточный ореол рассеяния; *6* — вторичный наложенный ореол рассеяния (стрелки указывают направление диффузии минеральных компонентов); *7* — растения, способные образовать биогенную составляющую наложенного ореола; *8* — горизонты возможной испарительной, сорбционной и биогенной аккумуляции рудных элементов; *9* — график результатов наземной литохимической съемки

классификационных признаков характеризует основные особенности формирования вторичных ореолов рассеяния в конкретном районе, а различные сочетания этих признаков определяют их возможные типы. В основу их выделения положены классификационные признаки, определяющие генетический тип ореола (остаточный, наложенный) и его доступность для обнаружения, а также некоторые дополнительные характеристики их природы (диффузионный, выщелоченный и т. п.) или положение относительно коренного оруденения. При этом заранее допускается формирование литохимических ореолов рассеяния с одновременным или раздельным участием твердых, растворимых и газообразных компонентов и роль каждой из фаз уточняется при описании отдельных типов. Признаки, определяющие тип ореола, рассматриваются на ближайшем к дневной поверхности горизонте, на котором он проявлен: открытые ореолы характеризуются на уровне дневной поверхности, а закрытые на минимальной глубине их надежного развития. В практике геохимических поисков этот уровень получил наименование «представительного горизонта для опоискования».

В Инструкции по геохимическим поискам рудных месторождений в качестве «наиболее важных в поисковом отношении»

обсуждаются 13 типов вторичных литохимических ореолов рассеяния [21]. При описании части из них указано «не изучен и в практике геохимических поисков не используется», некоторые типы при описании объединены. Очевидно, что по морфологическим особенностям и взаимоотношениям с рельефом характеристики ореолов рассеяния могут быть бесконечно разнообразны. Однако число главнейших типов вторичных ореолов рассеяния, с которыми в первую очередь приходится иметь дело в теории и практике литохимических поисков, не столь велико. Описание таких семи типов ореолов рассеяния (рис. 28), вошедшее в более раннюю Инструкцию (1965 г.), приводится ниже, с сокращениями и дополнениями новыми данными. Рассматриваемые ореолы I—IV принадлежат к открытому типу, в их числе ореолы II—IV являются наложенными, III—IV — наложенными аккумулятивными. Ореолы V—VII принадлежат к закрытому типу, в их числе ореолы V—VI являются остаточными (элювио-делювиальными).

Наибольшее поисковое значение имеют открытые остаточные (элювио-делювиальные) ореолы рассеяния месторождений (тип I), наличие которых обеспечило широкое и эффективное проведение обычных (наземных) литохимических съемок в рудных районах. Ореолы этого типа образуют месторождения любых генетических типов, залегающие в верхнем структурном этаже, во всех активно денудируемых районах. В подобных условиях на поверхности рудовмещающих пород развиты только их собственные продукты элювио-делювиального выветривания.

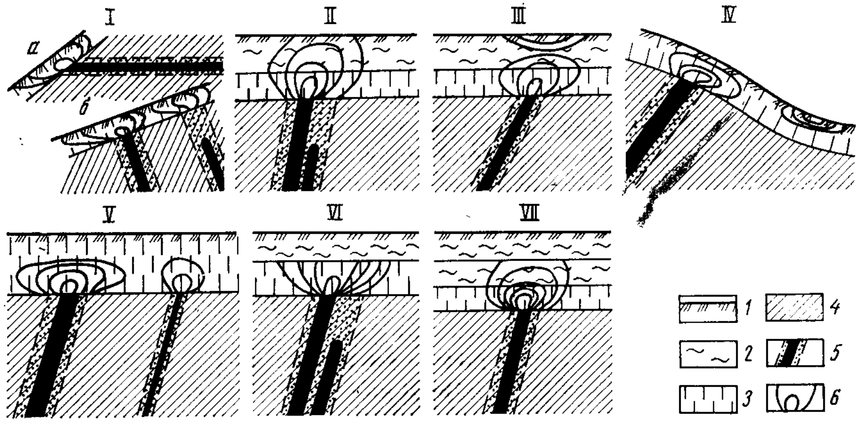


Рис. 28. Главнейшие типы вторичных литохимических ореолов рассеяния рудных месторождений:

I — остаточные элювио-делювиальные (*а* и *б*), II — диффузионный, III — надрудный, IV — оторванный, V — выщелоченный и предельно разубоженный, VI — погребенный, VII — наложенный погребенный.

1 — почвенно-растительный слой; *2* — дальнепринослые отложения; *3* — современный элювио-делювий или древняя кора выветривания рудовмещающих пород; *4* — рудовмещающие породы; *5* — рудные тела и их первичные ореолы; *6* — вторичные ореолы рассеяния

Формирование остаточных ореолов в основном обязано механическому рассеянию. Наиболее благоприятны для их образования горные районы, и этот признак подчеркивается наклоном дневной поверхности при изображении ореолов I типа (см. рис. 28), что не исключает их образования в элювиальных ландшафтах денудационных равнин и плоских водоразделов. Главнейшие результаты геохимических поисков — открытия новых промышленных месторождений цветных, редких металлов и золота в СССР и за рубежом преимущественно обязаны обнаружению вторичных литохимических ореолов рассеяния именно этого типа. В общем случае форма вторичных остаточных ореолов рассеяния в плане повторяет в увеличенном размере контуры выхода оруденения на поверхность коренных пород. В условиях расчлененного рельефа открытые остаточные ореолы рассеяния могут образовать горизонтально залегающие месторождения осадочного генезиса или древней коры выветривания (см. рис. 28, тип I, *а*), хотя главнейшее значение ореолы этого типа имеют для поисков крутопадающих эндогенных и осадочно-метаморфогенных месторождений (см. рис. 28, тип I, *б*), в том числе в условиях, когда выветриванием и денудацией затронуты только первичные ореолы рудных тел. Так, например, медноколчеданное месторождение на Южном Урале было открыто в 1958 г. на глубине около 200 м при разбуривании вторичного остаточного ореола рассеяния Cu, Pb, Ag, Ni, Co, выявленного наземной литохимической съемкой на поверхности и образованного за счет первичного ореола слепой рудной залежи. Вторичные остаточные ореолы рассеяния Pb были обнаружены до их выявления буровыми работами над 23-й Северной и 29-й Южной залежами полиметаллического месторождения Ачисай, находящимися в слепом залегании на глубинах соответственно 240—350 м и 25—70 м.

Открытые наложенные диффузионные ореолы рассеяния (тип II) характерны для равнинных районов с покровом аллохтонных (дальнеприносных) отложений ограниченной мощности, главным образом в умеренно влажной и аридной зонах (см. рис. 28). В этих ореолах резко преобладают процессы солевого рассеяния рудных элементов, в отдельных случаях наблюдались наложенные механические ореолы рассеяния устойчивых рудных минералов. Между формой наложенных диффузионных ореолов рассеяния и коренным оруденением возможны самые различные соотношения. За счет переменной мощности аллохтонных отложений ореолы этого типа даже в пределах одной рудной зоны могут по простиранию переходить в погребенное состояние (типы VI и VII), сочетаться с интервалами открытого остаточного ореола (тип I) или сменяться наложенными надрудными ореолами (тип III). Теоретическая дальность диффузии безграничная. С учетом длительности геологического времени это не ставит пределов для мощности дальнеприносных отложений, через которые, в принципе, способен распростра-

няться наложенный ореол рассеяния какого-либо месторождения. С практической стороны этот предел определяется быстрым убыванием показателя контрастности геохимической аномалии — величины «отношения полезного сигнала к уровню шума», определяемого выражением (10). При прочих равных условиях глубинность литохимических поисков может быть увеличена за счет более совершенной техники выполнения работ, как на это уже обращалось внимание при формулировке понятия о «закрытых» ореолах.

Образование надрудных (тип III) и оторванных (тип IV) наложенных ореолов происходит в условиях, когда солевое рассеяние сочетается с противоположной тенденцией единого процесса миграции рудных элементов — их гипергенной аккумуляцией. Объединяющий их признак аккумулятивного происхождения отражен в наименовании ореолов этих двух типов. Открытые наложенные аккумулятивные ореолы надрудного типа III отличаются от наложенных диффузионных наличием на глубине горизонта аллохтонных отложений, в котором с применением существующих технических средств ореолы не прослеживаются по вертикали. С одной стороны надрудные ореолы трудно отличимы от ландшафных геохимических аномалий, возникающих на различных геохимических барьерах в результате гипергенной аккумуляции металлов из окружающей среды и не связанных с наличием коренного оруденения на глубине. Подобные геохимические аномалии по признаку исчезновения с глубиной обычно признавались безрудными, однако можно предполагать, что некоторые из них, отбракованные при поисках, могли иметь своим источником промышленное оруденение. Учитывая первостепенную важность поисков погребенных месторождений в закрытых рудных районах, закономерности формирования и методы выявления наложенных ореолов рассеяния типов II—III подобно рассматриваются в разделе 3.8.

Оторванные аккумулятивные ореолы (тип IV) близки к описанным выше надрудным ореолам, отличаясь от них образованием при отсутствии аллохтонного покрова и отчетливым смещением от рудных тел в сторону современного стока. В этих условиях месторождения образуют открытые ореолы рассеяния (тип I), и только рудные элементы, обладающие в данной ландшафтно-геохимической обстановке высоким коэффициентом водной миграции, могут образовать выщелоченные с поверхности закрытые ореолы (тип V). За счет последующей аккумуляции рудных элементов с контрастной миграционной способностью в зоне гипергенеза (см. 1.8) в изменившейся геохимической обстановке возникают вторичные оторванные солевые ореолы, наложенные на местные элювио-делювиальные и аллювиально-пролювиальные отложения. В последнем случае эти ореолы могут непосредственно переходить в солевой (литохимический) поток рассеяния. Оторванные ореолы Mo и U отмечались, например, в горно-таежных районах Забайкалья. В окислительной обстановке хорошо промываемых и умеренно денудируемых склонов гумидной зоны эти элементы переходят в раствор и выщелачиваются из верхних горизонтов остаточных ореолов рассеяния. При стекании атмосферных осадков в заболоченные долины легкоподвижные шестивалентные молибден и уран осаждаются на восстановительном барьере в четырехвалентной форме. Аналогичные аккумуляции рудных элементов (например, Cu) имеют место при переходе от низких значений pH зоны сернокислого выветривания к нейтральной или слабо щелочной окружающей среде. Оторванные солевые литохимические ореолы могут быть связаны с выходом подземных минерализованных (ореольных) вод, омывающих на глубине невскрытое (слепое) рудное тело.

Вторичные литохимические ореолы рассеяния типов V—VII принадлежат к категории «закрытых». Выщелоченные и предельно разубоженные ореолы (тип V) образуются в элювио-делювии и принадлежат к классу остаточных ореолов. Они сходны по своей характеристике, однако причины для их превращения в закрытые ореолы различны. Образование закрытых выщелоченных с поверхности остаточных ореолов, как уже указывалось, характерно для элементов активных водных мигрантов в районах гумидной зоны при замедленной денудации. В современном элювио-делювии на территории СССР мощность выщелоченных горизонтов редко превышает 0,5—0,8 м, иногда в этих условиях наблюдается аккумуляция легкоподвижных элементов на уровне иллювиального почвенного горизонта «*B*». В ландшафтах влажного тропического климата и в древних корах выветривания возможен вынос рудных элементов, например, из обеленного каолинового горизонта, мощность которого может достигать 10 м и более. Однако полное выщелачивание даже легкоподвижных элементов, например фтора, молибдена и урана, из остаточных ореолов рассеяния, по-видимому, происходит не столь часто. По данным Е. Н. Васильева, открытые остаточные ореолы рассеяния фосфора сохраняются в профиле мощной коры выветривания в условиях сглаженного рельефа и гумидного климата в юго-западной части экваториальной Африки.

Закрытые предельно разубоженные ореолы образуются в результате закономерного протекания процесса рассеяния в сторону наиболее полного выравнивания концентраций элементов. Если при этом исходное количество металла в сечении рудной зоны M_p, м % было относительно мало, максимальные содержания металла в верхних горизонтах ореола могут не отличаться от обычных колебаний местного геохимического фона. В силу убывания с глубиной интенсивности гипергенного рассеяния остаточный ореол такой рудной зоны обнаруживается только на некоторой глубине от поверхности и вследствие этого должен именоваться закрытым ореолом. Закрытые ореолы этих типов называют «ослабленными у поверхности». Образо-

вание закрытых вторичных ореолов рассеяния в современном элювио-делювии наиболее характерно для рудопроявлений незначительного масштаба, в частности, для первичных ореолов слепых рудных тел. В тех же геологических условиях тело богатых руд образует открытый остаточный ореол.

Погребенные остаточные ореолы рассеяния (тип VI) являются аналогами современных элювио-делювиальных ореолов, отличаясь от них образованием в палеогеографических условиях и последующим перекрытием более молодыми осадками. Ореолы этого типа характерны для рудных районов, претерпевших длительное континентальное развитие в период, предшествовавший накоплению молодых осадков, в которых на пенепленизированной поверхности складчатого фундамента сохранилась древняя кора выветривания. В вертикальном разрезе коры выветривания погребенные ореолы имеют грибообразную, часто асимметричную форму, определяющуюся элементами залегания рудных тел и направлением палеостока. Максимальное площадное распространение они имеют на уровне пестроцветной коры выветривания, являющейся в данном случае представительным горизонтом для проведения литохимических поисков. В горизонтах щебенистой коры выветривания погребенные остаточные ореолы рассеяния постепенно сужаются, примыкая на глубине к рудным телам и их первичным ореолам. В перекрывающих кору выветривания дальнеприносных отложениях ореолы этого типа не прослеживаются. Конкретный пример погребенного остаточного ореола рассеяния, обнаруженного в триас-юрской коре выветривания, перекрытой неоген-четвертичными суглинками, показан на рис. 29. Наличие погребенных остаточных ореолов рассеяния рудных месторождений в древних корах выветривания определило создание методики глубинных литохимических поисков в закрытых равнинных районах.

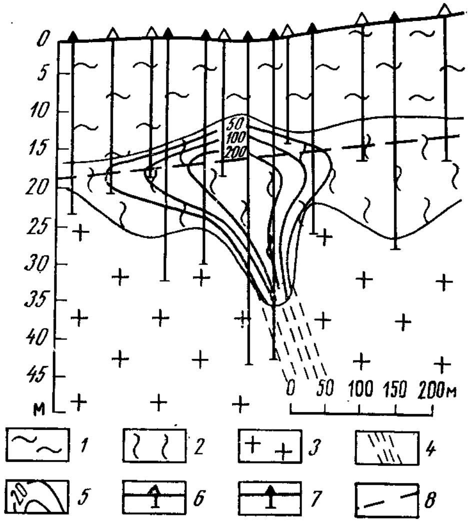


Рис. 29. Погребенный остаточный ореол рассеяния (Северный Казахстан). *По А. Н. Еремееву и А. П. Соловову.*

1 — неоген-четвертичные суглинки; *2* — триас-юрская кора выветривания; *3* — рудовмещающие гранитоиды; *4* — зона дробления; *5* — изоконцентраты рудного элемента в условных единицах; *6* — скважины поисковой съемки, пройденные СУГП-10; *7* — скважины колонкового бурения *8* — представительный горизонт для опоискования

Погребенные наложенные ореолы рассеяния (тип VII), в свою очередь, являются палеогеографическими

аналогами современных открытых наложенных ореолов (тип II), которые были перекрыты позднейшими осадками. За счет аккумуляции рудных элементов в определенных литологических горизонтах чехла в связи с их водоносностью, битуминозностью, карбонатностью и другими особенностями возможно образование наложенных литохимических ореолов, являющихся погребенными аналогами надрудных и оторванных ореолов III и IV типов. Все сказанное относительно открытых наложенных ореолов можно распространить и на погребенные наложенные ореолы. На территории закрытого рудного района наличие их нельзя гарантировать для всей исследуемой площади.

Изображение основных типов I—VII вторичных литохимических ореолов рассеяния (см. рис. 28) следует рассматривать в качестве генерализованной схемы, от которой в реальной геологической обстановке неизбежны различные отступления.

3.3. МЕХАНИЧЕСКИЙ ОРЕОЛ РАССЕЯНИЯ

Решающая роль в образовании вторичных остаточных ореолов рассеяния рудных месторождений принадлежит твердой фазе. Параллельно с физической дезинтеграцией рудного тела и вмещающих пород, несущих его первичный ореол, образовавшиеся в зоне выветривания обломки приобретают способность перемещаться относительно места своего первоначального залегания. Эта подвижность «частиц» горных пород в зоне выветривания проявляется в трех самостоятельных видах: 1) вся масса частиц может перемещаться под действием силы земного тяготения в форме пластических деформаций рыхлой толщи или местных разрывов ее сплошности; 2) отдельные частицы горных пород с поверхности рыхлой толщи могут быть удалены и затем переотложены, в частности, перемещены в сторону понижения рельефа к базису денудации и в область осадконакопления; 3) сами частицы внутри толщи рыхлых образований могут испытывать взаимные перемещения. Роль этих трех видов подвижности частиц в формировании поля рассеяния существенно различна. При этом, по закону независимости движения, каждая из этих подвижностей приводит к вполне определенному результату.

Перемещение всей массы частиц без взаимного их перераспределения не способно само по себе привести к образованию механического ореола рассеяния. Результатом его будут только смещение и деформация ореола, что подробнее рассматривается ниже. Удаление частиц и перенос их к базису денудации определяют формирование литохимического потока рассеяния. При ту или иную скорость непрерывного обновления ореола. При избирательном удалении частиц этот процесс ведет к обеднению или обогащению ореола. Образование механического ореола рассеяния обязано взаимному перемещению частиц внутри

рыхлой толщи продуктов выветривания. Действующими силами этого процесса являются агенты физического выветривания: расширение и сжатие вследствие колебаний температуры, замерзание и оттаивание воды, кристаллизация солей, динамическое воздействие дождя, ветра, действие корневой системы растений или землероющих животных и беспозвоночных и т. п. Перемещения отдельной частицы малы по своей амплитуде, носят хаотический характер и могут быть уподоблены броуновскому движению частиц или тепловому движению молекул. Средняя квадратическая длина «свободного пробега» частицы рыхлой горной породы в процессе этого взаимного перемещения отвечает по смыслу «коэффициенту их механического рассеяния» σ. Наибольшую взаимную подвижность частицы имеют вблизи дневной поверхности, соответствуя резким колебаниям температуры и влажности, обилию населяющих эти горизонты организмов, уменьшению размеров частиц и т. п. Абсолютное число таких перемещений отдельной частицы пропорционально длительности времени T_z, прошедшего с момента ее отделения от монолита, и, следовательно, будет наибольшим у дневной поверхности и наименьшим на глубине. Схематически эта закономерность изображена на рис. 30.

Для формирования поля рассеяния эта подвижность частиц имеет значение при наличии местного градиента концентраций химических элементов. На ограниченном участке рыхлых образований, возникших за счет разрушения какой-либо одной горной породы, все частицы по своему среднему химическому составу однотипны. В этих условиях взаимное перемещение частиц горной породы не приведет к изменению концентраций химических элементов, поскольку взамен переместившейся частицы придет другая частица того же элементарного состава. На границе двух различных горных пород и, в частности, на контакте вмещающей горной породы с рудным телом вследствие подвижности частиц взамен переместившейся возможен приход частицы другого минерального состава. Важная для нас собственно геохимическая подвижность элементов (скорость механического рассеяния) в направлении x будет пропорциональна градиенту концентрации $\frac{\partial C_x}{\partial x}$ вдоль этого направления. Взаимная подвижность частиц рыхлой толщи закономерно приводит к перемещению рудных частиц из мест их наибольшей концентрации в область более низких концентраций, т. е. к механическому рассеянию вещества месторождения.

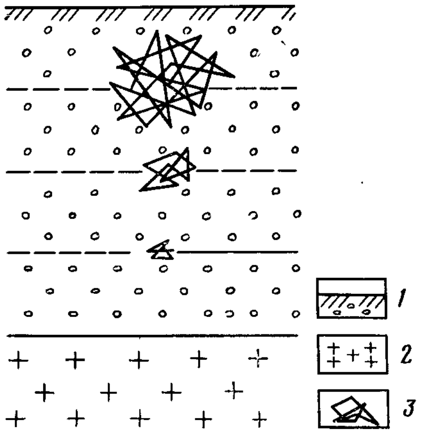


Рис. 30. Схема гипергенной подвижности частиц рыхлой толщи.

1 — элювий; 2 — коренные породы; 3 — случайная подвижность частиц на различных уровнях

Помимо уже упомянутых самородных металлов Au, Pt, касситерита и хромита, механическому рассеянию подвергаются многочисленные первичные и вторичные устойчивые в зоне выветривания рудные минералы: шеелит, вольфрамит, берилл, хризоколла, малахит, азурит, галенит, церуссит, массикот, платтнерит и другие свинцовые минералы, смитсонит и каламин, барит и витерит, киноварь, апатит, циркон и бадделит, рутил, ильменит, монацит, колумбит и танталит, пиролюзит, браунит, ряд вторичных минералов Ag, Ni, Co, Mo, Bi, Sb и многие другие. Эти минералы образуют промышленные скопления в виде первичных руд или слагают рудные тела на их выходах в зоне выветривания, и в этих минеральных формах входящие в них рудные элементы образуют остаточные литохимические ореолы рассеяния в твердой фазе. Рассмотренная выше взаимная подвижность частиц горных пород в зоне выветривания в ограниченном диапазоне условий является достаточной причиной для образования вторичных механических ореолов рассеяния, наложенных на отложения чехла и отвечающих признакам «диффузионного» происхождения (см. рис. 28, тип II). Привести к этому результату способно, например, криогенное перемешивание рыхлых отложений, которое может распространяться на глубину до 3—4 м. В районах с теплым климатом до глубины 8—10 м от поверхности распространяется влияние разнообразных землероющих животных и беспозвоночных, населяющих верхние горизонты суши. С учетом длительности существования жизни на Земле это определяет наличие биогенной составляющей механического рассеяния. Реальная возможность образования вторичных наложенных ореолов рассеяния в твердой фазе не вызывает сомнений, однако основное значение механическая миграция рудных минералов имеет для формирования остаточных ореолов рассеяния.

3.4 СОЛЕВОЙ ОРЕОЛ РАССЕЯНИЯ

Образование вторичного литохимического солевого ореола рассеяния подчинено двум основным условиям: 1) присутствию рудных элементов в форме водорастворимых соединений; 2) условию влагонасыщенности среды, в которой развивается рассеяние. Оба эти условия в зоне гипергенеза всегда соблюдены. Рыхлые продукты выветривания всегда содержат воду. Исключение в этом смысле не составляют даже мерзлые породы. По данным Е. М. Сергеева, замерзание капиллярной воды в дисперсных породах зоны выветривания при диаметре капилляров 0,24 мм происходит при —13,6 °С, а при диаметре капилляров 0,06 мм — при —18,5 °С, в то время как обычная темпе-

ратура устойчивой мерзлоты северо-востока СССР чаще всего колеблется около 5—6 °С ниже нуля. Самые сухие грунты засушливых районов прочно удерживают в себе влагу и способны пополнять ее запасы путем конденсации водяных паров из атмосферы. Поведение водорастворимых солей в поле рассеяния подчиняется сложным процессам обменных химических и физико-химических реакций, явлениям диффузии и капиллярного подъема растворов из глубины по направлению к дневной поверхности, сочетается с испарительной и биогенной аккумуляцией и выносом солей атмосферными осадками. Благодаря огромной продолжительности геологического времени в образовании солевого ореола принимают участие даже труднорастворимые минералы полезного ископаемого. Солевое рассеяние чаще всего связано с образованием минерализованных растворов в зоне соприкосновения зеркала грунтовых вод с телом полезного ископаемого путем прямого растворения первичных минералов залежи или в процессе их гипергенных изменений, до перехода во вторичные устойчивые разности. С точки зрения методики литохимических поисков наибольший интерес представляет формирование солевого ореола рассеяния окисляющегося сульфидного месторождения (Cu, Pb, Zn, Au, Ag, As, Bi, Sb, Mo, Sn, Ni, Co и др.).

Развитие зоны окисления сульфидных месторождений, по С. С. Смирнову [40], характеризуется следующими общими закономерностями. Залегающие выше первого водоупорного горизонта грунтовые воды находятся в свободном водообмене с поверхностью. За счет инфильтрации атмосферных осадков и конденсации паров грунтовые воды постоянно пополняются, а за счет истечения в открытую гидросеть и испарения происходит их разгрузка. В результате динамического равновесия между приходом и расходом воды устанавливается некоторый постоянный уровень грунтовых вод, поверхность которого в сглаженном виде повторяет рельеф дневной поверхности (рис. 31). Зеркало грунтовых вод подвержено сезонным и вековым колебаниям в зависимости от количества выпадающих атмосферных осадков. По мере денудационного понижения уровня земной поверхности и гипсометрических отметок точек разгрузки зеркало грунтовых вод постепенно понижается.

Атмосферные осадки насыщены кислородом и углекислотой и обладают окислительными свойствами, обычная дождевая вода имеет pH 6,0 (техногенные «кислые» дожди здесь не обсуждаются). В результате взаимодействия с горными породами они приобретают нейтральную или слабощелочную реакцию (pH 7,0—7,5). В зоне просачивания благодаря пленочному и капиллярному состоянию воды в обильном количестве содержатся атмосферные газы, что определяет окислительную обстановку этой зоны. Ниже зеркала грунтовых вод свободный газообмен с атмосферой ослабевает. В зоне застойных грунтовых вод в результате обеднения кислородом и гидролиза минералов

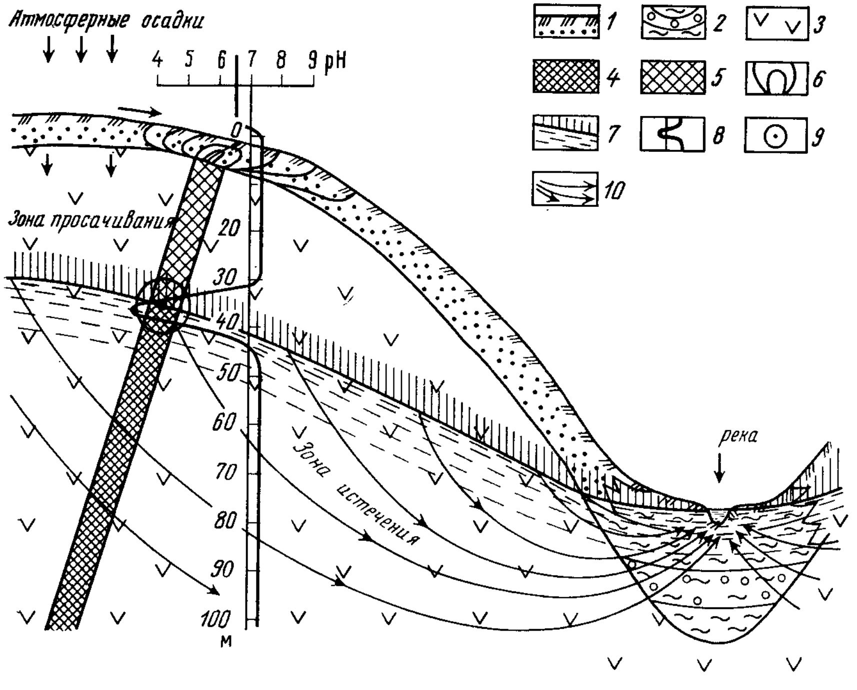


Рис. 31. Схема зоны окисления сульфидного месторождения.

1 — элювио-делювий; *2* — аллювий; *3* — рудовмещающие породы; *4* — сульфидные руды; *5* — окисленные руды; *6* — вторичный остаточный ореол рассеяния; *7* — грунтовые воды и капиллярная кайма; *8* — график изменения pH по глубине; *9* — область активного протекания процессов окисления; *10* — направление подземного стока

горных пород устанавливается щелочная реакция среды (pH>7) и господствует восстановительная обстановка.

Главнейшие сульфидные минералы и их аналоги обладают ничтожной прямой растворимостью в воде, лежащей в пределах 10^{-3}—10^{-22} г/л, но неустойчивы в гипергенных условиях и в водяно-воздушной обстановке зоны просачивания интенсивно окисляются. Процесс окисления пирита, наиболее распространенного сульфида, протекает по следующей схеме:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O = 2FeSO_4 + 2H_2SO_4.$$

В присутствии свободного кислорода закисный сульфат железа неустойчив и, окисляясь, переходит в сульфат окиси:

$$4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 = 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O.$$

В слабокислых водах $Fe_2(SO_4)_3$ гидролизуется, освобождая серную кислоту:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O = \underset{\downarrow}{\underline{2Fe(OH)_3}} + 3H_2SO_4.$$

Гидроксид железа, выпадая из раствора, в дальнейшем переходит в устойчивый лимонит $F_2O_3 \cdot nH_2O$. Образование

свободной серной кислоты имеет также место при окислении ряда других сульфидов. Присутствие серной кислоты определяет кислую реакцию среды и резкое понижение pH у зеркала грунтовых вод вблизи рудного тела. Так, например, в водах зоны окисления медноколчеданного месторождения Блява содержание аниона SO_4^{-2} достигало 123 г/л, а значения pH падали до 1,0—2,0. В водах из разведочных скважин, пробуренных на Гайском медноколчеданном месторождении, отмечались значения pH 3,2—4,0, а в связанном с ним «Купоросном озере» — до pH 1,1 при содержании SO_4^{-2} 2,6 г/л [16]. Однако эти низкие значения pH, как показали многочисленные наблюдения, чаще сохраняются только в непосредственной близости к рудному телу, обычно не выходя за его контуры. Взаимодействие с вмещающими породами приводит к нейтрализации кислых вод с образованием сульфатов Ca, K, Na, Mg, Al. В результате уже в непосредственной близости к рудному телу pH быстро повышается и наличие сильно кислых вод по периферии месторождений сульфидных руд является сравнительно редким случаем. Интенсивность нейтрализации кислых вод зоны окисления особенно велика в карбонатных породах.

Под действием серной кислоты, образующейся при окислении пирита, происходит дальнейшее интенсивное растворение и окисление массы сульфидных руд. Сильнейшее окисляющее и растворяющее действие оказывает также окисный сульфат железа $Fe_2(SO_4)_3$. Окисление полиминеральных руд активизируется за счет разности потенциалов электрической поляризации различных сульфидов [25]. Образующиеся в ходе окисления сульфаты тяжелых металлов, за исключением англезита $PbSO_4$, обладают высокими растворимостями (табл. 12) и способны к солевому рассеянию. Однако в условиях возрастания pH эти соединения неустойчивы и относительно полный вынос из зоны окисления характерен только для серы. Определяющее значение имеет общая направленность последовательных химических превращений сульфидных минералов в зоне окисления: сульфид→сульфат→карбонат⇆окисел (гидросиликат, фосфат и т. п.). В этом ряду превращений процесс протекает в сторону замены легко растворимых неустойчивых сульфатов труднорастворимыми устойчивыми минералами — конечными продуктами процесса окисления.

Окисленные руды сульфидных месторождений на поверхности коренных пород в процессе выветривания и денудации создают в элювио-делювиальных образованиях механические ореолы рассеяния. Солевое рассеяние в различной мере дополняет этот процесс. Постоянным очагом возникновения минерализованных растворов в окисляющемся сульфидном месторождении служит интервал рудного тела у зеркала грунтовых вод. Отсюда растворимые соединения распространяются в форме капиллярного поднятия растворов к дневной поверхности, диффузионного передвижения солей и медленного выноса растворов

Таблица 12

Растворимость в воде главнейших минералов зоны окисления сульфидных месторождений

Минерал	Состав	Растворимость, моль/л	Произведение растворимости
А. Легкорастворимые сульфаты — промежуточные (неустойчивые) соединения			
Госларит	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	531,2*	—
Моренозит	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	274,8*	—
Биберит	$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	265,8*	—
Мелантерит	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	263,0*	—
Халькантит	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	172,0*	—
Б. Труднорастворимые, конечные продукты окисления			
Англезит	$PbSO_4$	$1{,}35 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Барит	$BaSO_4$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Церуссит	$PbCO_3$	$3{,}9 \cdot 10^{-7}$	$3{,}6 \cdot 10^{-14}$
Смитсонит	$ZnCO_3$	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	$2{,}7 \cdot 10^{-8}$
Витерит	$BaCO_3$	$9 \cdot 10^{-5}$	$8{,}1 \cdot 10^{-9}$
Сферокобальтит	$CoCO_3$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-12}$
Кераргирит	$AgCl$	$1{,}25 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8 \cdot 10^{-10}$
Малахит	$2CuO \cdot CO_2 \cdot H_2O$	—	$6 \cdot 10^{-34}$
Азурит	$3CuO \cdot 2CO_2 \cdot H_2O$	—	$1{,}3 \cdot 10^{-45}$
Повеллит	$CaMoO_4$	$5{,}6 \cdot 10^{-5}$	$3{,}2 \cdot 10^{-9}$
Вульфенит	$PbMoO_4$	$3 \cdot 10^{-8}$	$8{,}5 \cdot 10^{-16}$

Примечание. Растворимость, отмеченная*, дана в г/л.

в направлении истечения грунтовых вод. Процесс истечения минерализованных растворов принимает участие в формировании гидро- и литохимического потоков рассеяния.

В процессе диффузии растворимые соли, устойчивые при низких значениях pH, передвигаются к дневной поверхности и в стороны, где pH быстро возрастает. В изменившейся геохимической обстановке по периферии солевого ореола металлы выпадают из раствора в виде труднорастворимых гидроксидов.

Серебро и ртуть сохраняются в растворе при слабощелочной реакции среды. Однако в присутствии столь обычного хлориона они выпадают из раствора — серебро в виде кераргирита ($AgCl$), а ртуть — в виде каломели ($HgCl$) и различных оксихлоридов. Для зоны окисления ртутных месторождений характерно образование самородной ртути [46]. В широком диапазоне pH в растворе устойчив молибден, растворимые соединения которого непосредственно вслед за их возникновением образуют труднорастворимый молибдат железа — молибдит ($Fe_2O_3 \cdot 3MoO_3 \cdot 7{,}5H_2O$) [40].

Другой причиной связывания водорастворимых компонентов солевого ореола является сорбция катионов тяжелых металлов разнообразными коллоидами зоны гипергенеза. Частым

минералом зоны окисления сульфидных месторождений является псиломелан ($MnO_2 \cdot nH_2O$), обладающий высокой адсорбционной способностью по отношению к Cu, Zn, Pb, Ni, Co и многим другим катионам. При этом четырехвалентный марганец выпадает уже из кислых растворов. Активными сорбентами тяжелых металлов являются глины, в первую очередь монтмориллонитового состава, характерные для рыхлых пород зоны выветривания. Известны глины, содержащие в виде химических соединений и продуктов сорбции до 20 % Zn, до нескольких процентов Pb, свыше 1 % Cu и т. д. А. А. Сауков [38] указывает, что каолин из слабых растворов почти нацело извлекает медь. В состоянии адсорбционной связи компоненты солевого ореола приобретают качества, свойственные твердым частицам рыхлых пород зоны выветривания, и в таком виде также подчиняются законам механического рассеяния.

Активная диффузия солей в горных породах протекает во всех случаях, когда достигнута пленочная влажность среды. Это условие хотя бы периодически возникает в зоне просачивания при выпадении дождей или таяния зимних запасов снега. Обменные химические реакции, гидратация и сорбция ведут к «закреплению солевого ореола» [34], придавая ему свойства устойчивого геологического образования, мало зависящего от эпизодического выпадения атмосферных осадков. Наряду с этим параметры солевых ореолов рассеяния зависят от степени аридности или гумидности климата, т. е. соотношения между годовым количеством атмосферных осадков и испаряемостью. Характеризовать зависимость солевого рассеяния от климата можно безотносительно к генетическому типу вторичных ореолов, понимая, что контуры остаточных механических ореолов рассеяния могут существенно отличаться от изображенных на рис. 32 солевых ореолов.

В условиях резкого преобладания количества годовых осадков над испаряемостью верхние горизонты рыхлых отложений интенсивно промываются дождевыми водами (pH 5—6), вследствие чего в обстановке замедленной денудации возможно возникновение кислой реакции среды ($pH<7$), отвечающей сиаллитной стадии выветривания. В заболоченной местности за счет содержащихся в воде органических кислот возможно pH 4,5. В обстановке избыточного увлажнения существуют условия для образования закрытых солевых ореолов на некоторой глубине от дневной поверхности, выщелоченных остаточных или погребенных наложенных. Не исключается и возможность существования открытого солевого ореола, в частности, за счет биогенной или сорбционной аккумуляции рудных элементов в почвенном слое. Развитие открытого солевого ореола в районах этой климатической зоны облегчается обычно неглубоким залеганием зеркала грунтовых вод. Подобная геохимическая обстановка характерна, например, для условий севера европейской части СССР и проявляется в почвенно-геологическом отноше-

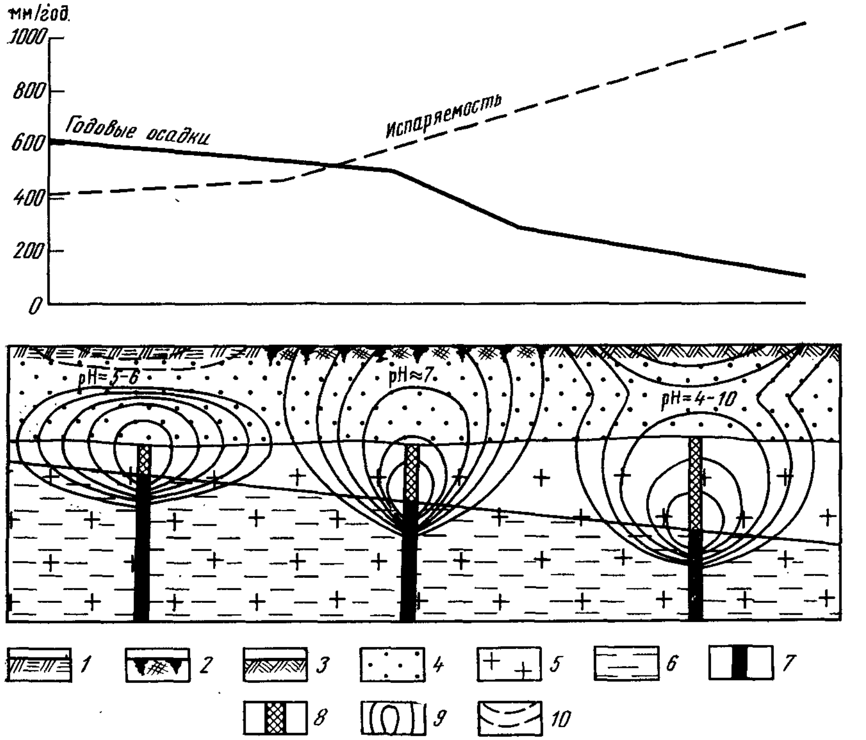


Рис. 32. Зависимость солевого ореола рассеяния от климата.

1 — подзолы и серые лесные почвы; *2* — черноземы; *3* — каштановые почвы, южные сероземы, солонцы и солончаки; *4* — рыхлые отложения; *5* — коренные породы; *6* — грунтовые воды; *7* — первичные сульфидные руды; *8* — окисленные руды; *9* — изоконцентраты; *10* — изоконцентраты возможные

нии развитием типичных подзолов и серых лесных почв. Совершенно иные условия формирования солевых ореолов рассеяния возникают в районах аридной зоны с резким преобладанием испаряемости над количеством атмосферных осадков. Здесь диффузионное распространение солей от горизонта, генерирующего минерализованные растворы, может дополняться накоплением солей в верхних горизонтах рыхлой толщи, в соответствии с известным явлением засоления почв. Благодаря малому количеству атмосферных осадков минерализация грунтовых и почвенных вод в зоне рудного тела и его солевого ореола может достигать огромной величины, а в зависимости от минералогии руд и местных условий значения pH среды могут изменяться в широком пределе. Так, в условиях засушливых пустынь Средней Азии в зоне окисления месторождений серы непосредственно на поверхности отмечались значения $pH<1$, обязанные присутствию в рыхлых отложениях свободной серной кислоты. Максимальные значения $pH=10$ наблюдались в той же клима-

тической обстановке в щелочных почвах Судана [29]. Районы умеренного климата средней полосы по условиям солевого рассеяния занимают промежуточное положение.

3.5. УРАВНЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РАССЕЯНИЯ

Для физико-математической характеристики солевого рассеяния в однородных горных породах с достаточным основанием привлекаются хорошо изученные законы диффузии. Допустимость распространения этих законов на доминирующее в остаточных литохимических ореолах механическое рассеяние твердых продуктов выветривания менее очевидна и потребовала дополнительного обоснования.

На первый взгляд, дискретный характер поля рассеяния — разнообразие состава и размеров обломков пород и руд, неравномерность насыщения твердой фазы водой, воздухом, растительностью, организмами или их отмершими остатками, казалось бы, затрудняют или даже исключают его строгий анализ. В действительности это не так, и возможность создания физико-математической теории гипергенного поля рассеяния подтверждается успешным использованием законов механики сплошных сред для решения реальных задач практики, несмотря на очевидную дискретность заполнения пространства атомами и молекулами твердого тела, жидкости или газа. Законность представлений о веществе как о сплошной среде вытекает из несоизмеримо малого размера молекул и расстояний между ними по сравнению с размерами обычных предметов окружающего мира, огромным числом этих молекул даже в небольшом объеме вещества, несоизмеримо малой продолжительностью времени между отдельными тепловыми движениями молекул по сравнению с продолжительностью ощутимых нами интервалов времени. Абстрагируясь от молекулярного строения вещества, мы рассматриваем реальную жидкость или газ в качестве фиктивной сплошной среды, что позволило, в частности, создать строгие законы гидродинамики и аэродинамики. В широком диапазоне геологических условий свойства сплошной среды допустимо условно присваивать и рыхлым породам поля рассеяния, независимо от их тонкодисперсного или обломочного характера. Решающее значение в этом случае имеют макроразмеры объектов исследования (участок поля, ореол, поток) по сравнению с микропроцессами в рыхлой толще, неограниченно большое число минеральных частиц или обломков, участвующих в процессе, и огромная геологическая продолжительность времени ощутимых изменений поля по сравнению с кратковременностью наших наблюдений. Действительно, число молекул N в 1 см^3 воды равно $3{,}3 \cdot 10^{22}$; в 1 см^3 газа при атмосферном давлении $N = 2{,}7 \cdot 10^{19}$. В качестве минимального объема рыхлых образований, подлежащего рассмотрению, можно взять 1 м^3. Число глинистых частиц при среднем размере 1 мкм в этом объеме, очевидно, будет $1 \cdot 10^{18}$, а для более тонких классов значительно превысит эту цифру. Соответственно для участка земной поверхности размером 1000 м $\times$ 1000 м при мощности рыхлой толщи 2 м число частиц со средним диаметром 0,1 мм составит $2 \cdot 10^{18}$, а для частиц диаметром 0,01 мм — $2 \cdot 10^{21}$. Число обломков при среднем размере 0,1 м в том же объеме — $2 \cdot 10^{9}$, однако для крупных частиц эта простая аналогия становится менее очевидной.

Для более полного обоснования законности аналогий между свойствами жидкости (или газа) и горными породами поля рассеяния следует напомнить о *принципе подобия* в механике, хорошо разработанном для решения физических задач и, в частности, привлекаемого к моделированию геотектонических процессов. Согласно этому принципу, для соблюдения подобия между рассматриваемыми явлениями при изменении одной из констант объекта все другие его константы должны быть изменены с *учетом размерности* этих констант. Иначе при простом количественном изменении одного из параметров объекта неизбежно наступает предел, при котором вещество приобретает новые качественные свойства, что хорошо характеризует диалектический принцип перехода количества в качество.

Реальные жидкости обладают коэффициентом динамической вязкости от 10^{-4} (эфир) до 10^{2} (касторовое масло при 20 °C), вязкость воды при 20 °C составляет примерно 10^{-3} Па·с. Поведение этих жидкостей мы наблюдаем при обычных для нас интервалах времени порядка 10^{-1} с — 10^{3} с. Продолжительность геологического времени измеряется величинами совершенно другого порядка и составляет $3 \cdot 10^{7}$ с (один год) до $3 \cdot 10^{15}$ с (сотни миллионов лет) и более. Размерность коэффициента вязкости $[\mu] = [ML^{-1}T^{-1}]$ и, следовательно, при условии сохранения постоянными других параметров среды и действующих сил только за счет изменения масштаба времени свойства жидкости будут обнаруживаться у тел с коэффициентом вязкости, увеличенным в кратное число раз. Изменение линейного масштаба в 100 или 1000 раз дополнительно расширяет эти пределы, поскольку условие подобия в механике при постоянстве прочих параметров подчиняется соотношению

$$\mu = \lambda\tau,$$

где μ — масшаб изменения вязкости; λ — масштаб изменения линейных размеров; τ — масштаб изменения времени.

Таким образом, в интервалах геологического времени и с учетом размеров объектов свойства реальных жидкостей можно ожидать у твердых тел, обладающих вязкостью 10^{8}—10^{19} Па·с и более. Все сказанное позволяет рассматривать рыхлые породы поля рассеяния в качестве сплошной среды, в которой протекают процессы, близкие к диффузии в жидкой фазе, независимо от того, участвуют ли в них растворимые или твердые

компоненты ореола. Это позволяет расширить понятие о гипергенных рудных «частицах», распространив его на обломки любого размера и коллоидно-дисперсную фракцию, несущую рудные элементы в состоянии сорбции, и на истинные растворы, в которых рудные элементы находятся в форме ионов. Все частицы под действием агентов выветривания или молекулярных сил находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения, природа которого была рассмотрена выше (3.3). Перемещение отдельно взятой частицы рыхлой толщи относительно совокупности окружающих её частиц принадлежит к разряду случайных явлений, т. е. к числу таких событий, которые в данных условиях и за данный отрезок времени могут наступить или не наступить. Случайное возникновение подвижности применительно к большому числу частиц и за большой отрезок времени будет иметь вполне определенную частость, характеризующую вероятность статистического процесса. В природной геологической обстановке оба условия соблюдены. Поэтому результатом случайной подвижности отдельных частиц в каждом случае будет строго закономерное их распределение. Это распределение рудных частиц в поле рассеяния и воспринимается нами в качестве вторичного литохимического ореола рудного тела. Математическую постановку задачи о литохимическом ореоле рассеяния можно свести к отысканию функции распределения рудных частиц в зависимости от действующих сил, параметров среды, пространственных координат и времени.

Рассмотрим распределение частиц рудного минерала в плоскости, секущей рудное тело перпендикулярно его простиранию и достаточно далеко от его концов, чтобы исключить их влияние (рис. 33). Для простоты дневную поверхность примем горизонтальной и параллельной плоскости yox, ось рудного тела, имеющего форму тонкой вертикальной жилы, с постоянным линейным количеством металла M совместим с линией oz. В начальный момент времени $T=0$ (до начала выветривания) все частицы рудного минерала были сконцентрированы вдоль плоскости yoz в интервале пренебрежительно малой мощности. Затем (в силу выветривания) частицы начали двигаться, совершая в интервале времени $T>0$ скачки в плоскости xoz различной длины и направления. В силу принимаемого постоянства содержаний металла в рудном теле ($C_р=\text{const}$) и в окружающей среде ($C_ф=\text{const}$) и, как следствие этого, существования начальных условий $\frac{\partial C}{\partial y}=\frac{\partial C}{\partial z}=0$, при $T=0$ рассеяние рудного вещества внутри элементарного слоя Δz, в первом приближении, допустимо считать зависящим только от x. Последующие — прибыль и убыль рудных частиц за счет выше- и нижележащих горизонтов ореола для такого элементарного слоя можно считать взаимно уравновешенными, а граничный слой у дневной поверхности исключить из рассмотрения как постоянно обновляемый денудацией. Вследствие симметрии условий, отклонения частиц влево и вправо от линии oz, очевидно, являются равновероятными и формирование литохимического ореола следует рассматривать как процесс бокового рассеяния (см. рис. 33).

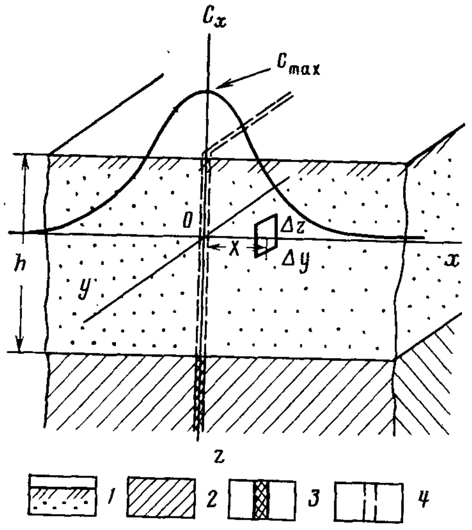


Рис. 33. К выводу уравнения рассеяния.
1 — элювио-делювий; *2* — коренные породы; *3* — рудное тело; *4* — положение рудного тела до выветривания

В такой постановке вопроса физическая сторона процесса литохимического рассеяния позволяет уподобить его задаче о распределении температур в окружающей среде, если в начальный момент времени $T=0$ в плоскости yoz выделяется некоторое количество тепла, или однотипной задаче о диффузии. Решение ее сводится к интегрированию линейного дифференциального уравнения с частными производными второго порядка параболического типа, известного под названием уравнения Фурье, которое для случая одномерного (линейного) рассеяния имеет вид:

$$\frac{\partial C_x}{\partial T}-D\frac{\partial^2 C_x}{\partial x^2}=0,$$

где D — коэффициент диффузии.

Решение его, устанавливающее экспоненциальную зависимость между C_x и x, имеется в курсах математической физики. Только с целью более ясного установления геологических зависимостей между действующими силами, параметрами среды, пространственными координатами и временем приведем наглядный, но не вполне строгий вывод формулы литохимического рассеяния, расчеты по которой дают нам те же результаты. Сохраняя прежние условия задачи, определим количество рудного вещества dM, перемещающегося за время ΔT через площадку $\Delta y \Delta z$ в произвольной точке на оси x (см. рис. 33), при градиенте концентрации рудного вещества в этой точке $\frac{dC_x}{dx}$.
Заметим, что количество вещества можно определить через число частиц или через весовые количества, что безразлично. Количество этого вещества dM будет пропорционально градиенту концентрации, размерам площадки, времени наблюдения и обратно пропорционально коэффициенту вязкости среды μ, или:

$$dM = -\varepsilon_1 \frac{1}{\mu} \frac{dC_x}{dx} \Delta y \Delta z \Delta T,$$

где ε_1 — коэффициент пропорциональности.

Но, с другой стороны, в точке x в данный момент времени могут находиться только частицы, обладающие некоторой фиктивной скоростью x/T, двигаясь с которой они за время T переместились из первоначального своего положения в плоскости yoz в место рассматриваемого сечения. Следовательно, dM пропорционально числу частиц C_x (концентрации) и их фиктивной скорости, или

$$dM = \varepsilon_2 C_x \frac{x}{T} \Delta y \Delta z \Delta T.$$

Приравнивая эти два выражения и производя сокращения, имеем:

$$C_x \frac{x}{T} = -\varepsilon \frac{1}{\mu} \frac{dC_x}{dx},$$

где $\varepsilon = \varepsilon_1/\varepsilon_2$; T — местный параметр, характеризующий длительность процесса выветривания.

При этом в связи с несоизмеримо малой продолжительностью наших наблюдений над ореолом по сравнению с продолжительностью геологического времени наблюденное распределение частиц, обязанное динамическому равновесию между выветриванием и денудацией, мы считаем постоянным, а сами частицы для данного момента рассматриваем как неподвижные. Разделяя переменные и интегрируя это дифференциальное уравнение, имеем:

$$\ln C_x = -\frac{\mu}{2\varepsilon T} x^2 + \ln C,$$

где $\ln C$ — постоянная интегрирования.

Освобождаясь от логарифмов и вводя буквенное обозначение $\sigma^2 = \frac{\varepsilon T}{\mu}$, получим

$$C_x = C e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Значение постоянной интегрирования определим через величину концентрации в центральной точке ореола. Вследствие симметрии условий при $x=0$ имеем $C_0 = C_{max}$, или

$$C_x = C_{max} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \qquad (52)$$

Частицы рудного вещества в поле рассеяния не могут произвольно возникать или уничтожаться, а только подвергаются

перераспределению вдоль оси x, постепенно переходя из состояния первичной концентрации в рудном теле в состояние вторичного рассеяния в толще рыхлых образований. Суммарное количество рудного вещества в ореоле рассеяния для неограниченной области с поперечным сечением, равным единице, будет оставаться постоянным и равным M, или

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} C_x dx = C_{max} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Это выражение, известное под названием интеграла Пуассона, равно $\sigma\sqrt{2\pi}$, или

$$M = C_{max}\sigma\sqrt{2\pi}; \qquad (53)$$

$$C_{max} = \frac{M}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \qquad (54)$$

Подставляя это значение C_{max} в выражение (52) и учитывая, что $C_ф \neq 0$, имеем окончательно:

$$C_x = \frac{M}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + C_ф. \qquad (55)$$

Таким образом, распределение рудных частиц в остаточном литохимическом ореоле рассеяния тонкой вертикальной жилы за вычетом фона подчиняется закону нормального распределения с параметрами M и σ, зависящими от характеристики оруденения и местных условий. При значениях $C_ф = 0$, $M = 1$ и $\sigma = 1$ выражение (55) приобретает вид

$$C_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$$

и носит название нормированной функции нормального распределения. Значения этой функции $C_x = f(x)$ и соответствующей ей интегральной функции

$$\Phi(x_i) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_i} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

табулированы в математических справочниках [7]. С нормальным распределением содержаний элементов (или их логарифмов) мы встретились уже при рассмотрении фоновых содержаний металла в пробах (см. 1.3). Однако эти однотипные математические законы в данном случае не имеют между собой ничего общего. Выражение (55) характеризует зависимость содержания металла C_x в данной точке от ее расстояния x до центра ореола. Это выражение устанавливает причинные (кау-

зальные) связи, определяющие конкретные содержания металла в точках наблюдения, однозначно зависящие от местных параметров и координат. В формуле (3), характеризующей распределение фоновых содержаний металла, величина $x=C_i$ выступает в качестве аргумента, а функцией является частость (n_i), с которой на участке случайно (беспорядочно) встречаются те или иные фоновые содержания металла, бо́льшие или меньшие среднего содержания $C_ф$. При этом невозможно заранее указать, какое конкретное содержание металла C_x будет встречено в точке с заданными координатами, можно только оценить вероятность, с которой содержание металла в любой точке будет лежать в определенных пределах или выйдет за эти пределы. В отличие от статистического распределения фоновых содержаний металла $n_i=f(C_i)$, которое мы приближенно описываем (аппроксимируем) нормальным или логнормальным законом, выражения $C_x=f(x)$, типа (55) и ему подобные, являются результатом решения математических задач о действующих связях, лежащих в основе геологического процесса. Эти теоретические функциональные зависимости характеризуют пространственно упорядоченные (детерминированные) распределения химических элементов в аномалиях.

Из рассмотрения табулированных значений нормального распределения следует, что остаточный литохимический ореол рассеяния характеризуется симметричной, быстроубывающей функцией с одним максимумом в начале координат, который при горизонтальной дневной поверхности и вертикальном падении рудного тела совпадает с эпицентром залежи. Параметр σ в выражении (55) имеет смысл коэффициента рассеяния, определяющего тот или иной вид графика концентраций металла в ореоле. Как видно из рис. 34, с увеличением коэффициента рассеяния σ при постоянном линейном количестве металла M в рудном теле форма вторичного остаточного ореола становится все более пологой, что выражает постепенное рассеяние частиц полезного ископаемого в массе продуктов выветривания вмещающих пород. Учитывая, что показатель степени при экспоненте $\frac{x^2}{2\sigma^2}$ величина безразмерная, обнаруживаем, что размерность $[\sigma]=[x]=L$. Выражая x в метрах, приходим к выводу, что величина коэффициента рассеяния измеряется в метрах, характеризуя среднее квадратическое удаление рудных частиц в процессе гипергенного рассеяния от их первоначального положения в рудном теле, что соответствует физической сущности рассмотренного нами линейного рассеяния. Физико-геологический смысл параметров M вытекает из условий, что это — суммарное (линейное) количество рудного вещества (металла) в ореоле, распределенное вдоль оси x, равное его количеству M_p в том же сечении рудного тела до начала выветривания. В идеальном остаточном ореоле рассеяния это определяет существование зависимости

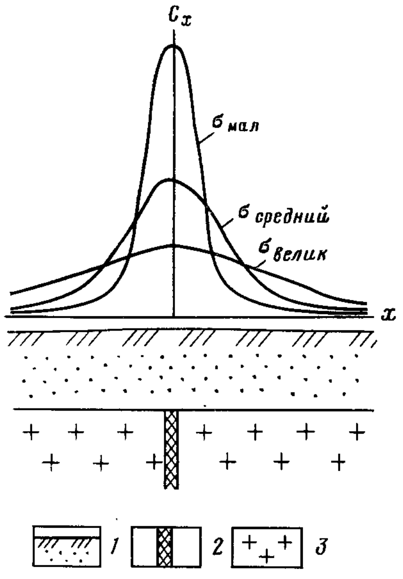


Рис. 34. Графики вторичных остаточных ореолов рассеяния рудной жилы для различных значений коэффициента рассеяния σ.

1 — элювно-делювий; 2 — рудная жила; 3 — рудовмещающие породы

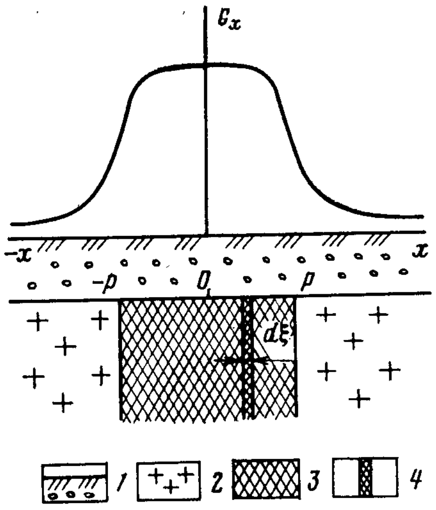


Рис. 35. График остаточного ореола рассеяния $C_x=f(x)$ над мощным рудным телом.

1 — элювий; 2 — рудовмещающие породы; 3 — рудное тело мощностью $2p$; 4 — элементарный рудный пласт мощностью $d\xi$ с центром в точке ξ

$$M=M_p=C_p\cdot 2p, \quad (56)$$

где p — полумощность коренного оруденения, послужившего для образования ореола.

Если, как это обычно принято в практике, выражать C_p в процентах, а p — в метрах, величина M будет измеряться в метропроцентах (м %). С геометрической стороны при $C_ф=0$ (т. е. за вычетом фона) величина M характеризует площадь, ограниченную графиком ореола $C_x=f(x)$ и осью абсцисс. Зависимость (56), верная для рудных тел любой мощности, позволяет уточнить понятие о «тонком» рудном теле, для которого

$$C_p\cdot 2p=C_{max}\sigma\sqrt{2\pi}. \quad (57)$$

Случайная подвижность частиц направлена к выравниванию концентраций и потому максимальное содержание металла во вторичном ореоле рассеяния не может превысить исходного содержания в рудном теле, или $C_p \geqslant C_{max}$, откуда

$$2p\leqslant \sigma\sqrt{2\pi} \approx 2{,}5\sigma. \quad (58)$$

Следовательно, «тонкими» могут считаться рудные тела с полумощностью $p<1{,}25\sigma$. Вторичные ореолы рассеяния таких рудных тел подчиняются принципу эквивалентности

мощности оруденения и содержания в нем металла, поскольку вид ореолов, согласно (56), зависит не от каждого из этих показателей в отдельности, а только от величины их произведения. Следовательно, существует бесчисленное множество различных пар значений C_p и $2p$, отвечающих постоянному значению параметра M м%, и совершенно одинаковые остаточные ореолы рассеяния при постоянных значениях σ образуются за счет существенно различных «тонких» рудных тел. В отличие от них, ореолы рассеяния мощных рудных тел ($p>1{,}25\sigma$) перестают подчиняться нормальному закону (55), графики ореолов приобретают плоский максимум и равенство (57) нарушается.

Решение задачи о математическом законе образования остаточного ореола рассеяния рудного тела любой мощности было дано Р. И. Дубовым [20]. Рудное тело неограниченной длины, вытянутое вдоль оси y, мощностью $2p$ с центром в начале координат и постоянным содержанием металла C_p мысленно разобьем на тонкие пласты мощностью $\Delta\xi$ с количеством металла в них $\Delta M = C_p\Delta\xi$ (рис. 35). Тогда составляющая рассеяния от каждого из этих пластов, согласно (55), определится из выражения

$$\Delta C_x = \frac{C_p\Delta\xi}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(\xi-x)^2}{2\sigma^2}},$$

где ξ — расстояние от начала координат до центра элементарного пласта, которое может принимать значение от $-p$ до $+p$.

Согласно принципу суперпозиции содержание металла в точке x, обусловленное рассеянием всей совокупности тонких пластов, образующих рудное тело, определится как сумма их влияний. Переходя к пределу $\lim\Delta\xi\to 0$, имеем

$$C_x = \frac{C_p}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-p}^{+p} e^{-\frac{(\xi-x)^2}{2\sigma^2}}\, d\xi.$$

Для заданной точки наблюдения x является параметром, переменной интегрирования здесь служит ξ. Полученный интеграл можно преобразовать к удобному для вычисления виду с помощью подстановки $\frac{\xi-x}{\sigma}=\tau$ и $d\xi=\sigma d\tau$. Заменяя пределы интегрирования и вынося σ за знак интеграла, имеем

$$C_x = \frac{C_p}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\frac{p+x}{\sigma}}^{+\frac{p-x}{\sigma}} e^{-\frac{\tau^2}{2}}\, d\tau =$$

$$= \frac{C_p}{2}\left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\frac{p-x}{\sigma}} e^{-\frac{\tau^2}{2}}\, d\tau + \frac{2}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\frac{p+x}{\sigma}} e^{-\frac{\tau^2}{2}}\, d\tau\right).$$

Стоящие в круглых скобках слагаемые — это интегралы вероятностей, численные значения которых имеются в математических справочниках. Используя общепринятые обозначения интегралов вероятностей как функций от их верхних пределов, представим полученную формулу в окончательном виде

$$C_x = \frac{C_p}{2}\left[\Phi\left(\frac{p+x}{\sigma}\right)+\Phi\left(\frac{p-x}{\sigma}\right)\right]+C_ф. \tag{59}$$

Таким образом, график содержаний металла в остаточном ореоле рассеяния мощного рудного тела по профилю, удаленному от его концов, зависит от трех параметров: C_p, p и σ. Подставляя в (59) значение $x=0$, найдем величину максимального содержания металла в центральной точке ореола (за вычетом фона) [7]

$$C_{max} = C_p\Phi\left(\frac{p}{\sigma}\right). \tag{60}$$

Из табличных значений $\Phi(x)$ видно, что в идеальном остаточном ореоле рассеяния уже при $\frac{p}{\sigma}>2{,}0$ величина C_{max} очень мало отличается от C_p. Перенеся начало координат на границу рудного тела и принимая $2p\to\infty$, из выражения (59) найдем уравнение вторичного ореола рассеяния над контактом двух горных пород с высоким C_p и низким $C_ф$ содержанием металла:

$$C_x = \frac{C_p}{2}\left[1\pm\Phi\left(\frac{x}{\sigma}\right)\right]+C_ф. \tag{61}$$

Здесь знак плюс перед интегралом вероятности отвечает случаю, когда порода с высоким содержанием металла C_p расположена в области положительных значений x (рис. 36), знак минус отвечает переходу в этой области к фоновым содержаниям.

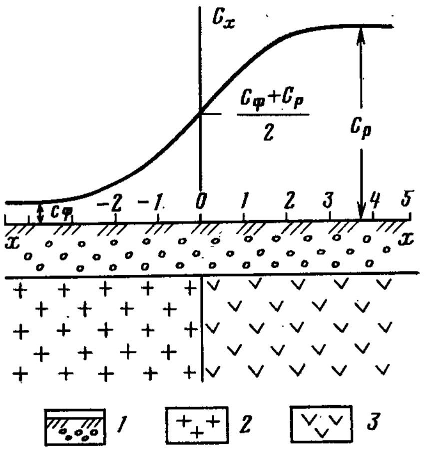


Рис. 36. График ореола рассеяния над контактом пород.
1 — элювий; 2 — породы с содержанием металла $C_ф$; 3 — породы с содержанием металла C_p

Поскольку любое рудное тело ограничено по простиранию, профиль наблюдения может располагаться вблизи от его концов. В этом случае $\frac{\partial C_y}{\partial y}\neq 0$ и содержание металла в ореоле приобретает характер двумерной зависимости $C_x=f(x, y)$. Простейшим образом эта задача решается для рудных тел прямоугольной формы со сторонами $2p_x$

(мощность) и $2p_y$ (длина по простиранию) с постоянным содержанием металла в рудах $C_р$. Помещая начало координат в центре рудного тела и обозначая ξ и η координаты произвольной точки в рудном теле до его выветривания, по аналогии с предыдущим, напишем:

$$C_x = \frac{C_р}{2\pi\sigma^2} \int\limits_{-p_x}^{+p_x} \int\limits_{-p_y}^{+p_y} e^{-\frac{(\xi-x)^2+(\eta-y)^2}{2\sigma^2}} d\xi d\eta.$$

Разделяя двойной интеграл на два простых и производя соответствующую подстановку, получим окончательно

$$C_x = \frac{C_р}{4}\left[\Phi\left(\frac{p_x+x}{\sigma}\right)+\Phi\left(\frac{p_x-x}{\sigma}\right)\right] \times$$

$$\times\left[\Phi\left(\frac{p_y+y}{\sigma}\right)+\Phi\left(\frac{p_y-y}{\sigma}\right)\right]+C_ф. \qquad (62)$$

Отсюда, при $x=y=0$ найдем максимальное содержание металла в центральной точке ореола (за вычетом фона)

$$C_{max} = C_р\Phi\left(\frac{p_x}{\sigma}\right)\Phi\left(\frac{p_y}{\sigma}\right). \qquad (63)$$

Следовательно, распределение содержаний металла в остаточном ореоле рассеяния рудного тела прямоугольной формы зависит от четырех параметров $C_р$, p_x, p_y и σ. Если профиль наблюдения, располагающийся вкрест простиранию рудного тела, удален от его ближайшего конца на расстояние $y>2\sigma$, выражение (62) заменяется одномерной зависимостью (59), а для тонких рудных тел при $p_x<1{,}25\sigma$ — нормальным распределением (55). Теоретические содержания металла в ореолах рассеяния над телами с эллиптическим (в частности, круговым) сечением в плане отличается не более чем на 10 % от содержаний металла в ореолах над эквивалентными рудными телами прямоугольной (в частности, квадратной) формы, и эти различия уменьшаются с уменьшением размеров тел по сравнению с величиной местного коэффициента рассеяния σ [20]. Более строгий анализ остаточных ореолов рассеяния формально потребовал бы решения трехмерной задачи $C_x=f\ (x,\ y,\ z)$, поскольку уже с первых моментов возникновения ореола ($T>0$) условие $\frac{\partial C_z}{\partial z}=0$ нарушается в силу зависимости параметров T, а следовательно, и C_z, от глубины. Однако соответствующие расчеты показывают, что рассмотренные распределения при условии $C_р=\text{const}$, $M_р=\text{const}$ и допущении о монотонном убывании σ_z с глубиной отличаются от трехмерных зависимостей менее чем на 5 %. Это позволяет для целей практики ограничиться найденными одномерными и двумерными зависимостями.

3.6. ПАРАМЕТРЫ ВТОРИЧНОГО ОРЕОЛА РАССЕЯНИЯ

Физико-математические законы гипергенного рассеяния показывают, что содержание металла по периферии ореолов асимптотически приближается к уровню геохимического фона, подчиняясь зависимости $C_x \to C_ф$ при $x \to \pm\infty$. Следовательно, «истинные размеры» вторичных ореолов рассеяния не поддаются строгому определению и теоретически бесконечно велики. Это лишний раз подтверждает чисто условный, технический смысл тех величин, которые в практике именуются «размерами» ореолов (см. 1.5). Параметрами, объективно характеризующими вторичный ореол рассеяния, связанное с ним коренное оруденение и местную геохимическую обстановку, являются максимальное содержание металла в ореоле C_{max}, коэффициент гипергенного рассеяния σ, количество металла в ореоле по профилю M м % или в плане, коэффициент остаточной продуктивности k и ряд других геохимических показателей. Оценки численных значений этих параметрических величин уточняются одновременно с увеличением точности исследований.

Максимальное содержание металла в центральной точке остаточного ореола рассеяния согласно выражениям (54), (60) и (63) при постоянных параметрах коренного оруденения зависит от величины местного коэффициента рассеяния σ, т. е. от миграционной способности или геохимической подвижности рудных элементов при гипергенном ореолообразовании. Процесс рассеяния не следует смешивать с возможным частичным выносом рудного элемента за пределы ореола, роль которого отражает коэффициент продуктивности $k<1{,}0$, входящий в зависимости (18) и (19).

При выводе функции рассеяния (55) буквенный символ σ был принят нами для обозначения величины

$$\sigma = \sqrt{\frac{\varepsilon T}{\mu}}, \qquad (64)$$

где ε — произвольный коэффициент пропорциональности.

Для установления его смысла воспользуемся «методом размерностей», имея в виду, что $[\sigma]=L$, $[T]=T$ и $[\mu]=mL^{-1}T^{-1}$. Подставляя эти значения в (64) и решая его относительно $[\varepsilon]$, имеем:

$$[\varepsilon]=mLT^{-2}.$$

Следовательно, ε имеет размерность силы, или

$$\varepsilon=\xi F,$$

где F — сила; ξ — безразмерный (численный) коэффициент.

В окончательном виде выражение для коэффициента гипергенного рассеяния будет иметь вид

$$\sigma=\xi\sqrt{\frac{FT}{\mu}}. \qquad (65)$$

Значения F, T и μ определяются местными ландшафтно-геохимическими условиями, характеризуясь конкретными величинами в пределах данного полиминерального ореола рассеяния. Индивидуальные свойства рудных элементов в процессе гипергенного рассеяния отражает численная величина коэффициента ξ. Очевидно, что та или иная подвижность рудных «частиц» зависит от их формы и размера, от плотности и поверхностно-молекулярных свойств, т. е., в конечном счете, от их химического и минералогического состава, от роли безминеральных форм существования рудного элемента и т. п. В пределах одного ореола рассеяния значения ξ для различных металлов и разных минералов могут существенно различаться.

При выводе формулы литохимического рассеяния мы не связали себя какими-либо дополнительными предположениями о характере рудных частиц и, следовательно, рассеяние частиц любого типа будет происходить по закону нормального распределения. Вследствие различных значений ξ даже в ореоле одного рудного элемента коэффициенты рассеяния для частиц различного минерального состава будут различаться. Так, например, во вторичном остаточном ореоле рассеяния свинцового оруденения можно предполагать одновременное участие первичного галенита и разнообразных вторичных минералов свинца: англезита, церуссита, массикота, платтнерита, пироморфита, фосгенита, цезаролита, вульфенита и многих других, в том числе безминеральных форм. Каждое из этих соединений свинца способно распределяться в ореоле с различными коэффициентами рассеяния σ_{PbS}, σ_{PbSO_4}, σ_{PbCO_3}, σ_{PbO}, σ_{PbO_2} и т. д. Однако это не приведет к отступлениям от нормального закона (55) для распределения общих содержаний свинца в ореоле, которые безотносительно к формам его нахождения определяются, например, при эмиссионном спектральном анализе литохимических проб. Согласно центральной предельной теореме Ляпунова [8], сумма большого числа n соизмеримых случайных величин, распределенных нормально с параметрами M_i; σ_i, также распределена нормально с параметрами

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \ldots + M_n \text{ и}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \ldots + \sigma_n^2}\,.$$

Это свойство устойчивости нормального распределения объясняет его широкое распространение в природе.

Величины F, μ и T, определяющие значение σ, изменяются с глубиной, что вызывает изменение величины коэффициента рассеяния по вертикальному разрезу рыхлых образований. В общем случае величина коэффициента вязкости горных пород μ зоны выветривания минимальна вблизи дневной поверхности, соответственно их наиболее рыхлому состоянию, и максимальна на уровне плотных коренных пород в начальной стадии выветривания. Величина действующей силы F, очевидно, убывает с глубиной соответственно быстрому уменьшению амплитуды колебаний температуры и воздействия внешних динамических факторов под покровом вышележащей толщи, убыванию роли биогенных процессов и т. д. Величина продолжительности выветривания T также убывает с глубиной и на границе коренных пород $T=0$. Зависимость ее от координаты z однозначно определяется из выражения (50) для случая динамического равновесия между выветриванием и денудацией. Если F и T убывают с глубиной, а μ хотя и возрастает с глубиной, однако в выражении (65) стоит в знаменателе, следовательно, коэффициент рассеяния σ от максимальной величины на поверхности $\sigma_0 = \sigma_{max}$ должен убывать с глубиной и на уровне коренных пород принимать значение $\sigma_h = 0$. С учетом этих граничных значений, без каких-либо дополнительных предположений о характере функциональных зависимостей μ, F и T от z, можно допустить, что коэффициент рассеяния является линейной функцией z, подчиняясь зависимости

$$\sigma_z = \sigma_0 \frac{h - z}{h}\,. \qquad (66)$$

Многочисленные исследования вертикальных разрезов остаточных ореолов рассеяния это достаточно хорошо подтверждают. Численные значения σ по графикам детальных литохимических съемок, зрительно сходных с их теоретическим видом для тонкого рудного тела (рис. 37), определяются «методом трех уровней». Табулированные значения функции нормального распределения [7] показывают, что расстояние между абсциссами точек с ординатами $C_x = 0{,}607C_{max}$ (за вычетом фона) для теоретической кривой соответствует 2σ. Расстояние между абсциссами для ординат $C_x = 0{,}325C_{max}$ соответствует 3σ и расстояние между абсциссами для $0{,}135\ C_{max}$ равно 4σ. Это дает возможность по ширине ореола на уровне этих трех значений C_x получить три независимых определения величины σ. Если найденные по графику ореола три значения σ совпадают между собой в пределах погрешности от ± 10 до ± 15 % (что не хуже точности спектрального анализа), приходим к выводу об удовлетворительном совпадении наблюденных данных с теоретической формулой (55). Если найденные значения σ закономерно уменьшаются с увеличением интервала графика, по которым они определялись, т. е. наблюдается соотношение σ (по $0{,}607C_{max}$) $>\sigma$ (по $0{,}325C_{max}$) $>\sigma$ (по $0{,}135C_{max}$), это соответствует рудному телу большой мощности, и тогда определение величины σ следует проводить с помощью палеток Дубова.

В основу теоретических моделей образования вторичных остаточных ореолов рассеяния положены допущения о постоянстве параметров оруденения M_p, C_p, $2p$ по падению залежей. Это определяет постоянство погоризонтных количеств металла

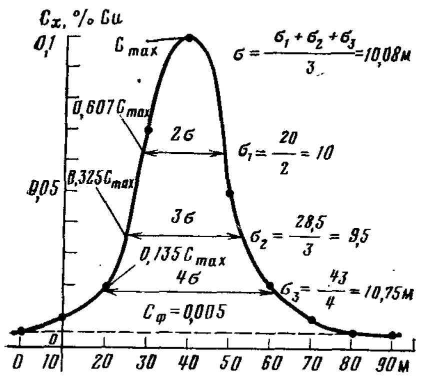


Рис. 37. К расчету коэффициента рассеяния σ методом «трех уровней».

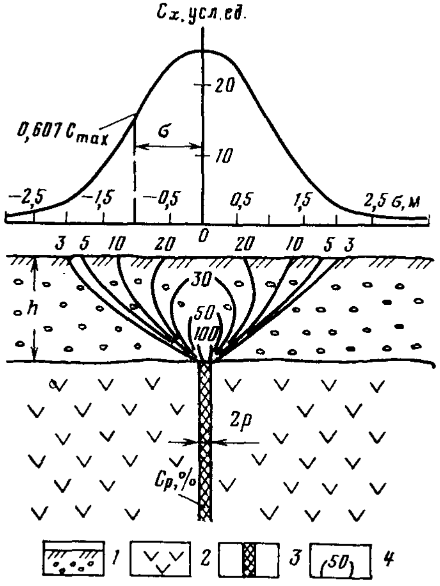


Рис. 38. Вертикальный разрез и график идеального остаточного ореола рассеяния.

1 — элювий; 2 — рудовмещающие породы; 3 — рудное тело; 4 — изоконцентраты элемента в условных единицах

M_z в идеальном остаточном ореоле рассеяния по всему вертикальному разрезу элювио-делювия в интервале $0 \leqslant z \leqslant h$. Для условий $M_z = M_p = \mathrm{const}$ и убывания коэффициента рассеяния σ_z с глубиной на рис. 38 изображен вертикальный разрез такого ореола рассеяния в изолиниях. Расчеты проведены через $0{,}1h$ при $\sigma_0 = 1{,}0$ и $h = 1{,}5\sigma_0$ для тонкого вертикального рудного тела и горизонтальной дневной поверхности. В этом простейшем случае вторичный литохимический ореол рассеяния имеет в разрезе вид веера, расширяющегося к дневной поверхности.

Величина параметра М при постоянном расстоянии между точками пробоотбора Δx по профилю определяется по формуле (15). При переменном шаге наблюдений, что часто связано со сгущением точек опробования в центральной части ореола, выражение (15) заменяется более универсальной формулой

$$M = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2} \right) C_i - 2aC_{\text{ф}}, \tag{67}$$

где x_i — абсцисса точки с содержанием металла C_i; $2a$ — эффективная ширина ореола.

При этом за начало отсчета расстояний $x_0 = 0$ принимается первая краевая точка, ограничивающая ореол слева по профилю, с содержанием $C_0 < C_A$. Зная величину σ, можно для ореола с одним четко выраженным максимумом подсчитать количество металла М м% из выражения (57), согласно которому

$$M = (C_{\max} - C_{\text{ф}})\, 2{,}5\sigma. \tag{68}$$

Однако эта формула дает только приближенное значение М, поскольку полученный результат целиком зависит от точности спектрального анализа, с которой определена величина $C_{\max}$. В практических целях всегда следует пользоваться формулами (15) или (67).

Зависимость (56), устанавливающая равенство количеств металла в идеальном остаточном ореоле рассеяния М и в исходном коренном оруденении M_p, в реальных геологических условиях нарушается, заменяясь пропорциональной зависимостью (18). По опыту величина коэффициента остаточной продуктивности $k \gtrless 1{,}0$, связывающего величины M и M_p, может изменяться в десятки раз, завися от индивидуальных свойств химических элементов, от морфологии оруденения и местных ландшафтных условий. Поэтому знание численной величины этого параметра для условий района работ и главнейших рудных элементов является обязательным. Величина его в общем случае изменяется с глубиной, или $k_z = f(z)$, где $0 \leqslant z \leqslant h$, определяясь гипергенными процессами накопления металла в тех или иных горизонтах зоны выветривания ($k > 1{,}0$) или его выщелачиванием из ореола ($k < 1{,}0$). Выщелоченный металл может поступить в поток рассеяния и конечный водоем стока, он может подвергнуться полному рассеянию в окружающем ландшафте или образовать вторичные аккумуляции на геохимических барьерах в контуре ореола или за его пределами. Накопление металла в остаточном ореоле рассеяния против его исходного количества в коренном оруденении может быть, в частности, связано с гравитационной дифференциацией минералов по плотности, с повышенной растворимостью породообразующих минералов, с испарительной, биогенной и сорбционной аккумуляцией рудных элементов у дневной поверхности. Местные значения $k \gtrless 1{,}0$ в профиле остаточных ореолов рассеяния, по-видимому, устанавливаются за относительно малое геологическое время.

Если удаление рудных частиц с поверхности горного склона силами денудации отстает от удаления безрудных частиц, произойдет относительное накопление рудных минералов в верхних горизонтах ореола. Вследствие этого в последующий момент времени удаление рудных частиц в количественном отношении возрастет и накопление замедлится. Эти встречные процессы быстро достигнут равновесия. Такой же саморегулирующий характер будут иметь процессы избирательного растворения рудных или породообразующих минералов. Упрощен-

ные расчеты показывают, что динамическое равновесие при $k=2,0$ достигается, например, за время менее 100 лет в условиях, когда длительность формирования верхнего горизонта ореола рассеяния составляет 10 тыс. лет (T_o).

Общие законы геохимии гипергенеза позволяют дать априорные оценки значениям коэффициентов остаточной продуктивности k в зависимости от ландшафтных условий формирования ореолов рассеяния и свойств рудных элементов.

1. В активно денудируемых горных районах любых ландшафтно-геохимических зон благодаря быстрому обновлению ореолов рассеяния индивидуальные различия между химическими элементами сглаживаются, и для всех рудных элементов можно ожидать значения $k \approx 1,0$.

2. В районах гумидной зоны со сглаженным рельефом и замедленной денудацией для элементов, способных к активной водной миграции (F, Sr, Li, Cs, Rb, B в боратах, иногда U, Mo и др.), следует ожидать значений $k<1,0$. В районах аридной зоны для тех же условий и тех же элементов при наличии процессов испарительной аккумуляции будут обнаруживаться значения $k>1,0$.

3. В районах гумидной зоны со сглаженным рельефом и замедленной денудацией для рудных элементов, представленных тяжелыми ($d>4$ г/см^3) и устойчивыми в зоне выветривания первичными или вторичными минералами (Au, Pt, Sn, W, Nb, Ta, Zr и др.), можно ожидать значений $k>1,0$.

4. В профиле современных элювио-делювиальных образований и древних кор выветривания величина коэффициента остаточной продуктивности $k \lesseqgtr 1,0$ изменяется по вертикали и на глубине $z \to h$ приближается к своему теоретическому значению для идеальных остаточных ореолов рассеяния $k=1,0$. Эти общие данные о вероятных значениях коэффициента пропорциональности k в конкретных условиях требуют уточнения для последующего использования при оценке выявленных ореолов рассеяния.

Прямым методом определения местных значений k служат сопоставления количеств металла в ореолах рассеяния, подсчитанных по формулам (15) или (67), с количествами металла в тех же метропроцентах, подсчитанными по данным бороздового и линейного опробования коренного оруденения, вскрытого канавами, пройденным по тем же профилям с учетом смещения ореола. Пример такого определения коэффициента остаточной продуктивности олова для ландшафтов Кавалеровского района показан на рис. 39 по данным опробования канавы, вскрывшей оловорудные жилы Летнюю и Декабрьскую Новогорского рудопроявления. Участок слагают песчаники и алевролиты нижнего мела, расстояние между жилами не превышает 25 м. По профилю XI они образуют общий ореол рассеяния с количеством металла $M=1,36$ м% Sn при суммарной продуктивности коренного оруденения $M_p=1,66$ м % Sn.

После приведения этих цифр к сечениям, отвечающим истинной мощности рудной зоны, имеем:

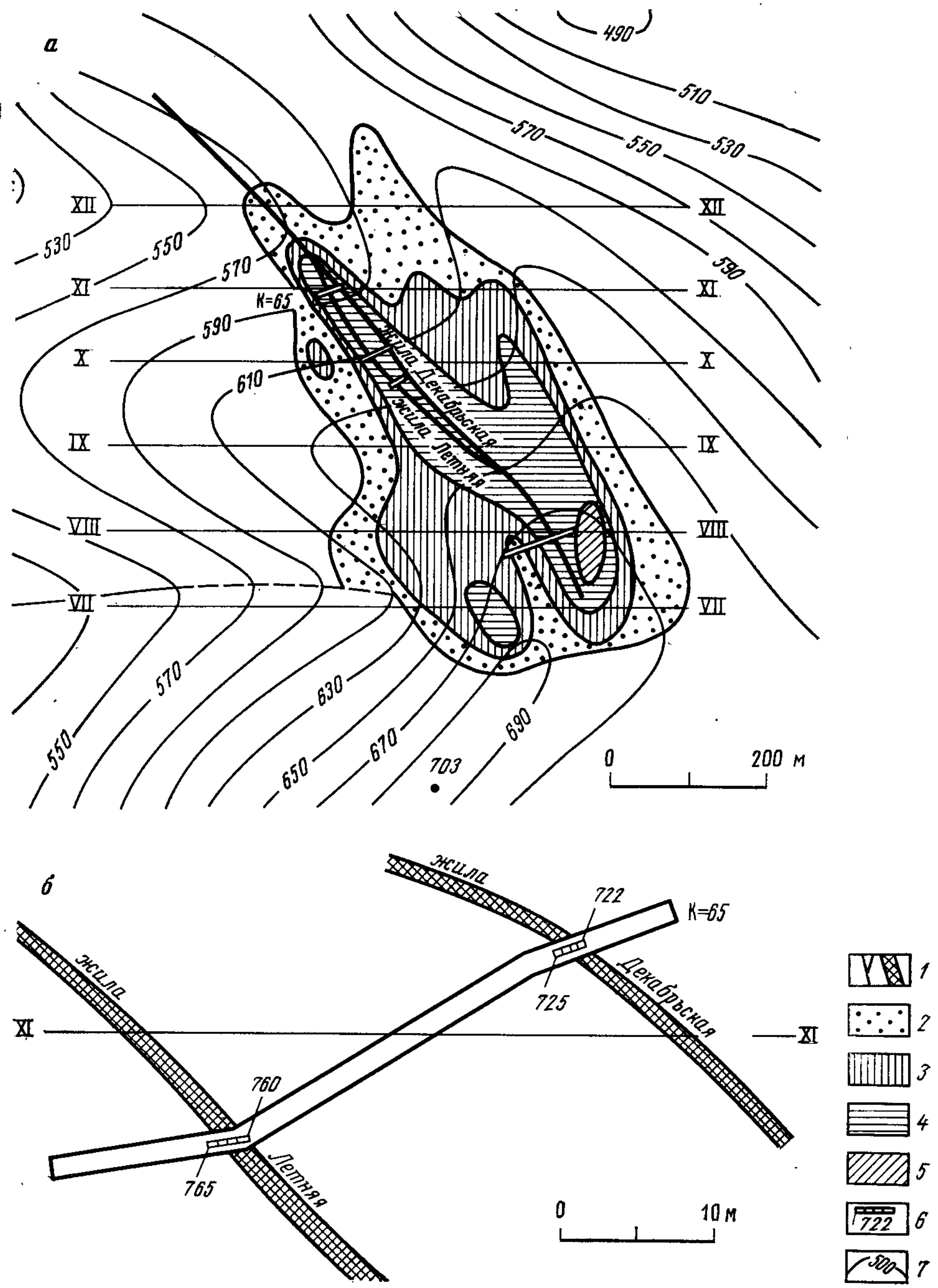
$$k=\frac{M_{ист}}{M_{p\,(ист)}}=\frac{1,04 \text{ м } \%}{1,45 \text{ м } \%}=0,72.$$

Всего по Новогорскому рудопроявлению было сделано четыре определения k, среднее из которых составило $\tilde{k}=1,19$.

Для большинства месторождений опробование канав дает достаточно надежные данные для оценки коэффициента пропорциональности k между остаточным ореолом рассеяния и первичным оруденением. Учет возможного перераспределения рудных элементов в зоне окисления в специфических случаях, естественно, необходим. Так, например, оценка коэффициента пропорциональности для вторичных ореолов рассеяния меди на месторождениях порфировых медных руд требует обязательного указания, относится ли найденная величина k к коренному оруденению на выщелоченных выходах, вскрытому канавами, к рудам зоны вторичного сульфидного обогащения или к бедным первичным рудам, пересеченным разведочными скважинами.

По морфологии и условиям залегания наиболее благоприятны для оценки коэффициента продуктивности k по канавам крутопадающие рудные тела простой формы, достаточно протяженные и выдержанные по простиранию и падению, для которых величина k имеет устойчивое местное значение. Для рудных тел большой мощности, например штокверковых месторождений изометрической формы ($2p_{xy} \gg 4\sigma$), величина коэффициента продуктивности k становится тождественно равна отношению между содержаниями металла в ореоле рассеяния в области его плоского максимума $\bar{C}_{max}$ и в коренном оруденении (см. рис. 35). Во всех остальных случаях, когда содержание металла во вторичном ореоле рассеяния зависит от P/σ, оценка k требует подсчета количеств металла в метропроцентах. Дополнительные сведения о величине k дают сравнения M с M_p по скважинам разведочного бурения или подземным выработкам, вскрывающим первичные руды ниже зоны окисления. Такие сопоставления законны для тел простой формы, для которых величина M_p выдержана по падению и простиранию залежи.

Более полная характеристика коэффициента продуктивности k достигается путем изучения его величины по вертикальному разрезу ореола. Производя детальный отбор проб на различной глубине от дневной поверхности и подсчитывая количество металла M на каждом горизонте, можно построить график $M_z=f(z)$. Пример изменения M_z и, следовательно, k_z с глубиной по разрезу вторичного ореола рассеяния урана показан на рис. 40. Здесь на дневной поверхности ореол заметно ослаблен, возможно, за счет примеси аллохтонного материала, характе-



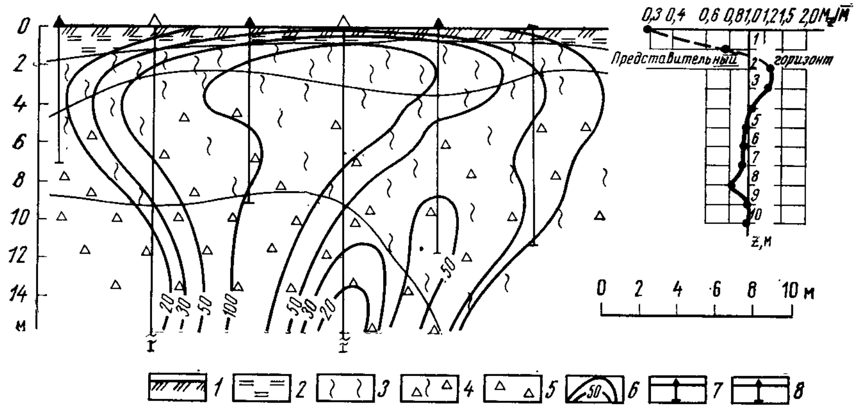


Рис. 40. Вертикальный разрез ореола рассеяния и график $M_z/\overline{M}$.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — глины. Древняя кора выветривания: 3 — глинистая; 4 — глинисто-щебенистая; 5 — щебенистая; 6 — изолинии гамма-активности в условных единицах. Скважины: 7 — шнекового бурения; 8 — колонкового бурения

ризуясь значениями $<0{,}3\overline{M}$. В интервале 2—3 м наблюдается некоторое накопление металла, порядка 1,3 $\overline{M}$, очевидно, за счет его гипергенного выщелачивания из верхних горизонтов. Начиная с глубины 4 м и до 10 м значения M_z остаются практически постоянными, несмотря на сложную конфигурацию вторичного ореола рассеяния, образованного двумя сближенными рудными зонами, обособление которых обнаруживается на глубине 14 м по мере падения величины σ_z. На уровне 8 м отмечается снижение M_z до $0{,}82\overline{M}$, что, вероятно, связано с длительным стоянием на этой глубине современного зеркала грунтовых вод. Данные колонкового бурения подтверждают примерное значение $k \approx 1$ в интервале устойчивых значений M_z.

Неблагоприятны для оценки коэффициента пропорциональности k по канавам рудные тела четкообразной формы с частыми пережимами и раздувами оруденения, чередующимися через интервалы менее 2σ. Колебания оценок k_i в однородном ландшафте, связанные с неравномерным характером оруденения, могут достигать десяти-двадцатикратной величины. Обусловлено это рассеянием металла по простиранию рудной зоны, в результате которого во вторичные ореолы над пережимами поступает металл со стороны раздувов и одновременно обедняются ореолы над богатыми интервалами оруденения. Призна-

Рис. 39. Оценка коэффициента остаточной продуктивности k по профилю XI Новогорского рудопроявления. *По П. А. Куршеву.*

а — вторичный ореол рассеяния олова ($M_{ист} = 1{,}04$ м % Sn); *б* — план канавы К-65. 1 — рудные жилы. Содержание олова в элювно-делювии (в %): 2 — $1\cdot10^{-3}$—$2\cdot10^{-3}$; 3 — $2\cdot10^{-3}$—$6\cdot10^{-3}$; 4 — $6\cdot10^{-3}$—$20\cdot10^{-3}$; 5 — $20\cdot10^{-3}$—$60\cdot10^{-3}$; 6 — бороздовые пробы и их номера; 7 — изогипсы

Для жилы Декабрьской $M_{ист} = 0{,}25$ м % Sn, для жилы Летней $M_{ист} = 1{,}2$ м % Sn

ком таких условий служит отрицательная ранговая корреляция между M_p и k. Во всех таких случаях среднее геометрическое из найденных значений k_i не соответствует природному значению коэффициента пропорциональности $k_{ист}$. При значимой отрицательной корреляции между M_p и k, а также при больших и неясных смещениях ореолов рассеяния правильное значение k можно определить по величине отношений между площадными продуктивностями ореола рассеяния и коренного оруденения. Для серии разобщенных канав, по которым оценка площадной продуктивности оруденения затруднительна, истинное значение k в первом приближении можно найти как отношение сумм всех значений M_i и M_{pi} из выражения

$$k_{ист} = \frac{\Sigma M_i}{\Sigma M_{pi}}. \qquad (69)$$

Для ориентировки в табл. 13 приведены некоторые определения местных коэффициентов остаточной продуктивности для важнейших металлов по данным различных авторов. Эти значения подтверждают, например, отчетливую зависимость $\tilde{k}$ (Pb) и $\tilde{k}$ (Zn) от ландшафтно-геохимических условий. Для свинца в сопоставимых ландшафтах отмечается возрастание коэффициента пропорциональности $\tilde{k}$ в карбонатных породах по сравнению с его значением для силикатных пород. Объясняется это более высокой растворимостью $CaCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$ и $CaSO_4$ по сравнению с растворимостью тех же соединений Pb.

Почти полностью отсутствуют сведения о коэффициентах остаточной продуктивности для ландшафтов зарубежных стран, не проявленных в пределах СССР, в частности, для условий тропической зоны и латеритного выветривания. Для любых ландшафтов существует некоторое минимальное значение $(M_p)_{min}$, ниже которого при местных значениях коэффициентов k и σ вторичный ореол рассеяния на поверхности обнаруживаться не будет. Связано это с реализацией условия

$$\frac{k\,(M_p)_{min}}{\sigma\sqrt{2\pi}} < C_A - C_ф, \qquad (70)$$

где k может заведомо отличаться от нуля. Выражение (70) характеризует переход остаточного ореола рассеяния в закрытое состояние с образованием «предельно разубоженного ореола» (см. рис. 28, тип V). Попутно отметим, что любые определения k при очень малых значениях M_p во всех случаях должны считаться недостоверными. Выражение (70) отвечает рудному телу жильной формы, для мощных тел ($2p_x$, $2p_y > 5\sigma$) оно упрощается, приобретая вид

$$k\,(C_p)_{min} < C_A - C_ф. \qquad (71)$$

Здесь $(C_p)_{min}$ обозначает то нижнее содержание металла

Таблица 13

Местные значения коэффициентов остаточной продуктивности k

Район	Геохимические ландшафты	Рудовмещающие породы	Химический элемент	n	$\tilde{k}$	$\varepsilon^{\pm1}$
Заилийский Алатау	Горнолуговые — высокогорных выровненных водоразделов гумидной зоны	Гранодиориты	Pb Zn	12 6	0,07 0,32	1,41 1,68
То же	Горнолуговые — пологих склонов семиарндной зоны	Эффузивно-осадочные породы	Pb Zn	25 25	0,31 0,37	1,16 1,15
»	Степные — крутых склонов аридной зоны	То же	Pb Zn Mo Au	30 30 10 26	0,67 0,76 0,47 0,46	1,19 1,19 1,12 1,02
Центральный Казахстан	Сухие степи, мелкосопочник	Метаморфические сланцы эффузивно-осадочные	Pb	107	0,71	1,15
Угамский хребет	Лугово-степные — выровненных водоразделов семигумндной зоны	Известняки	Pb	6	1,44	1,25
Рудный Алтай	Горно-лесные	Эффузивно-осадочные	Pb Zn	8 4	0,68 0,25	1,47 1,12
Восточное Забайкалье и Дальний Восток	Горно-таежные	Метаморфические сланцы	Pb	25	0,8	1,05
Восточное Забайкалье	Горно-таежные	Метаморфические сланцы	Pb	70	0,60	1,13
То же	То же	Известняки	Pb	42	1,02	1,20
Хребет Сихотэ-Алинь	Горно-лесные	Песчаники, сланцы	Sn	62	1,92	1,15

в коренном оруденении, при котором ореол рассеяния не обнаруживается на поверхности при $k > 0$.

Подсчеты площадной продуктивности P при равномерной сети наблюдений лучше всего вести по карте с численными результатами спектрального анализа проб по формулам (16) или (17). При переменном расстоянии между профилями съемочной сети выражение (16) заменяется более общей формулой:

$$P = \sum_{i=1}^{m} \frac{y_i + y_{i+1}}{2} M_i, \qquad (72)$$

где y_i — расстояние в м по нормали от первого профиля до ближайшего профиля, лежащего за пределами ореола, для которого $M_o = 0$.

5 Заказ № 405

Для характеристики площадной продуктивности ореола взамен величины P, м^2% удобен показатель q, выраженный в тоннах металла для слоя в 1 м. Умножая величину P на плотность горных пород d, для простоты принимаемую $d=2{,}5$ т/м^3, и деля на 100 для перехода от процентов к тоннам металла, имеем

$$q=Pd\cdot 10^{-2}=P/40 \text{ т/м}. \quad (73)$$

Характеризовать ореолы рассеяния в части выщелачивания или аккумуляции металлов в различных генетических горизонтах почвенного профиля в общем случае могут только графики $M_z=f(z)$, $P_z=f(z)$ и значения k_z. Геологическую оценку выявленных рудных объектов по их ореолам рассеяния в числе прочих признаков характеризуют величины M, P и местные значения k.

3.7. СМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ОРЕОЛОВ

Положение центральной точки вторичного литохимического ореола рассеяния C_{max} совпадает с эпицентром выхода оруденения на поверхность коренных пород при вертикальном его падении и горизонтальной дневной поверхности (см. рисунки 39—43). В остальных случаях центральная точка ореола смещается относительно эпицентра оруденения на расстояние, зависящее от элементов его залегания, рельефа местности, мощности рыхлых образований, глубины опробования и ряда других причин. При горизонтальной дневной поверхности геометрическое место центральных точек (ось) остаточного ореола в разрезе элювия определится путем реконструкции выветрелой и рассеявшейся части тела, от его выхода на поверхность коренных пород, в сторону восстания,— до ее пересечения с дневной поверхностью. В простейшем случае, когда выветривание протекает без изменения объема исходной горной породы, рассеяние от эпицентра рудного тела до точки C_{max} на поверхности определится из простой зависимости

$$S_\beta=h\operatorname{ctg}\beta, \quad (74)$$

где $\beta<90°$ — угол падения рудного тела.

При опробовании на некоторой глубине $z\leqslant h$ от дневной поверхности и выветривании с изменением объема выражение (74) приобретает вид

$$S_\beta=B(h-z)\operatorname{ctg}\beta, \quad (75)$$

где B — коэффициент пропорциональности.

Если выветривание происходило с увеличением объема, ранее занимавшегося коренной горной породой, то $B<1{,}0$; при выветривании с уменьшением объема $B>1{,}0$; значение $B=1{,}0$ отвечает выветриванию при постоянном объеме.

При углах падения рудных тел $\beta>45°$ и выветривании с увеличением объема $(B<1)$, смещение центральных точек ореола

по восстанию от проекции коренного выхода рудного тела S_β всегда будет $<h$ и на практике им часто можно пренебрегать. Напротив, при углах $\beta<45°$ и выветривании с уменьшением объема смещение ореола по восстанию может достигать существенной величины $S_\beta\gg h$. Наибольшее уменьшение объема при выветривании свойственно карбонатным породам, а также изверженным породам основного состава. В обычных условиях умеренного климата выветривание гранитов протекает без изменения объема. Рассчитанный согласно этому с учетом зависимости (75) литохимический ореол рассеяния пологопадающего рудного тела показан на рис. 41.

Рыхлые элювио-делювиальные образования на горном склоне даже при самом незначительном уклоне местности находятся в состоянии медленного непрерывного движения к подножию склона. Движение это происходит под действием силы тяжести и проявляется благодаря огромной геологической продолжительности процесса. Именно вследствие длительности времени давление, формирующееся под действием собственного веса толщи рыхлых пород зоны выветривания на склоне, разрешается в форме неупругих деформаций, не наблюдаемых при значительно больших, но кратковременных нагрузках. В процессе движения рыхлые образования увлекают за собой развитые в них ореолы рассеяния, и положение центральных точек ореола

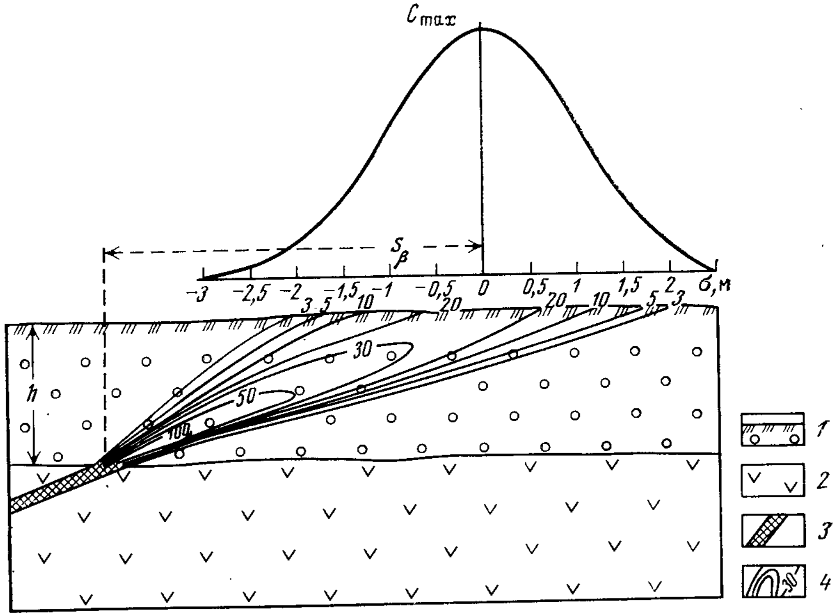


Рис. 41. Вертикальный разрез и график остаточного ореола рассеяния при пологом падении рудного тела (выветривание без изменения объема, $B=1$).
1 — элювий; *2* — рудовмещающие породы; *3* — рудное тело; *4* — изоконцентраты элемента в условных единицах

оказывается смещенным к подножию склона от эпицентров рудных тел. Наличие этих перемещений подтверждается многочисленными наблюдениями над положением ореолов рудных тел и проявляется хорошо известным явлением загиба голов крутопадающих пластов на горных склонах (см. рис. 26).

Движение, т. е. сползание рыхлых образований по склону, происходит крайне медленно, и в соответствии с принципом подобия (см. 3.5) может рассматриваться как ламинарное течение жидкости с чрезвычайно большим коэффициентом вязкости. Движение плоского слоя жидкости остается ламинарным в пределах условий, определяемых величиной безразмерного числа Рейнольдса $Re \leqslant 700—900$, вычисляемого из выражения:

$$Re = \frac{h\bar{v}}{\nu},$$

где h — толщина слоя жидкости; ν — кинематический коэффициент вязкости; $\bar{v}$ — средняя скорость.

Для нашего случая, где ν очень велико, а $\bar{v}$ очень мало, заведомо соблюдено условие $Re \ll 700$. Ламинарное, т. е. свободное от поперечных вихрей (не турбулентное) движение элювио-делювия не может привести к формированию ореола рассеяния на склоне. Результатом его является только смещение ореола без изменения характера распределения (рассеяния) рудных минералов внутри каждого слоя рыхлых образований и, следовательно, графика ореола C_x на поверхности или на постоянной глубине[1]. Этот, на первый взгляд недостаточно очевидный, вывод вытекает из уже упоминавшегося выше закона независимости движения, согласно которому взаимная подвижность частиц рыхлой толщи, ведущая к рассеянию рудных элементов, не зависит от поступательного движения всей массы частиц.

Механическое рассеяние рудных частиц или диффузионное распространение солевого ореола на склоне происходит равномерно во все стороны, в том числе и вверх по склону, и способно опережать сползание элювио-делювиальных образований к его подножию. Это приводит к важному выводу, что краевые (периферические) части остаточного ореола рассеяния, а в особых случаях и его центральная точка, на дневной поверхности или на глубине могут лежать гипсометрически выше коренного выхода рудного тела.

Задача о характере движения элювио-делювия на склоне имеет достаточно строгое аналитическое решение. Рассмотрим поведение рыхлых образований на плоском склоне с углом наклона α к горизонту. Протяженность склона примем достаточно

[1] Причины возникновения асимметричных литохимических ореолов рассеяния на вогнутых склонах рассматриваются ниже и не связаны с движением элювио-делювия (см. 3.9).

большой, чтобы исключить влияние его границ; рудное тело в форме тонкой вертикальной жилы примем вытянутым вдоль горизонталей склона, что позволит рассмотреть решение плоской задачи. Падение рудного тела примем перпендикулярным к плоскости склона. Мощность элювио-делювия по нормали к склону h примем для рассматриваемого участка постоянной, начало координат выберем в точке, являющейся проекцией коренного выхода рудного тела на поверхность склона (рис. 42). На каждый бесконечно тонкий слой рыхлых образований, лежащий на глубине z от поверхности и движущийся по склону со скоростью v, действуют две силы: 1) касательная к поверхности склона составляющая давления всей вышележащей толщи, равная $dgz\sin\alpha$, где d — плотность пород на горизонте z, g — ускорение силы тяжести; 2) обратно направленная сила внутреннего трения среды, равная градиенту скорости по нормали к направлению движения dv/dz, умноженному на коэффициент вязкости среды μ.

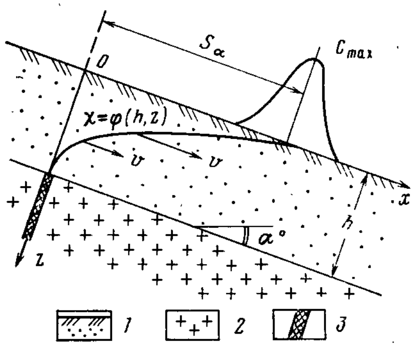


Рис. 42. Смещение остаточного литохимического ореола рассечения на плоском склоне.

1 — элювио-делювий; *2* — рудовмещающие породы; *3* — рудное тело

Движение рыхлых образований по склону происходит в условиях равновесия двух этих сил и, следовательно,

$$dgz\sin\alpha = -\mu\frac{dv}{dz}. \qquad (76)$$

Значение динамического коэффициента вязкости среды μ и связанного с ним кинематического коэффициента вязкости $\nu = \mu/d$ не являются величинами постоянными. Изменяясь монотонно с глубиной, μ и d минимальны вблизи дневной поверхности, где процессы выветривания получили наиболее полное развитие, и достигают наибольшей величины на глубине плотных коренных пород, не затронутых выветриванием.

В общем случае зависимость $\nu=\varphi(z)$ нам неизвестна. Для решения задачи сделаем допущение, что кинематический коэффициент вязкости среды, в увязке с предыдущим, изменяется с глубиной по уже использованному нами гиперболическому закону, подчиняясь в интервале $0 \leqslant z \leqslant h$ зависимости

$$\nu = \frac{\nu_0 h}{h - z},$$

где ν_0 — кинематический коэффициент вязкости верхнего горизонта рыхлых образований.

Эта зависимость выражает первоначальное медленное изменение свойств среды от поверхности на глубину, а затем при значениях z, близких к h, — быстрое возрастание ν до значений $\nu_{max} \gg \nu_0$. Подобное изменение коэффициента вязкости элювиоделювия наиболее вероятно из геологических соображений и соответствует сравнительно резкому переходу от собственно рыхлой толщи к плотным коренным породам.

Вводя кинематический коэффициент вязкости, перепишем условия равновесия пород на склоне:

$$gz \sin \alpha = -\left(\frac{\nu_0 h}{h-z}\right)\frac{dv}{dz}.$$

Разделяя переменные и интегрируя это уравнение, имеем:

$$\frac{g \sin \alpha}{\nu_c h}\left(\frac{z^3}{3} - \frac{hz^2}{2}\right) = v + c,$$

где c — постоянная интегрирования. Значение ее найдем из условий $v=0$ при $z=h$, откуда

$$v = \frac{g \sin \alpha}{6\nu_0 h}(2z^3 - 3hz^2 - h^3).$$

За время T, прошедшее от начала процесса до момента наблюдения, любой из горизонтов рыхлых образований сместится по склону от своего первоначального положения на величину:

$$S_\alpha = \int_0^T v \mathrm{d}T,$$

где для условий установившегося подвижного равновесия

$$T = T_0 \frac{h-z}{h}.$$

Здесь T_0 является параметром, характеризующим местные условия и, согласно (51), равно времени от начала выветривания произвольного слоя коренных пород до момента удаления его продуктов выветривания силами денудации. Осуществляя подстановку $\mathrm{d}T = \frac{-T_0}{h}\mathrm{d}z$ и заменяя пределы интегрирования, имеем:

$$S_\alpha = \frac{gT_0}{12\nu_0} \sin \alpha \frac{h^4 - 2h^3 z + 2hz^3 - z^4}{h^2} = A\chi \sin \alpha, \quad (77)$$

где $A = \frac{gT_0}{12\nu_0}$ — параметр, зависящий от местных условий; $\chi = \varphi(h, z)$ — функция, определяющая геометрическое место точек центров послойных сечений ореола в толще рыхлых образований.

Из выражения (77) подстановкой $z=0$ находим важное для практики смещение ореола в поверхностном слое элювио-делювия относительно проекции коренного выхода рудного тела на плоскость склона:

$$S_{\alpha_0} = Ah^2 \sin \alpha. \quad (78)$$

Вид кривой, определяющей положение центральных точек ореола в вертикальном разрезе элювио-делювия, найдем, вычисляя значения многочлена χ, полагая $h=1$ и выражая z в долях h. Соответствующая им кривая изображена на рис. 42. С геометрической стороны она представляет собой параболу четвертого порядка.

На рис. 43 показаны в изоконцентрациях металла вертикальные разрезы трех ореолов, рассчитанные для плоского склона. Расчеты произведены по формуле рассеяния для тонкого пласта с показателем степени при экспоненте $-\frac{(x - S_\alpha)^2}{2\sigma^2(1-z)^2}$, где S_α определяется выражением (77) и значениями многочлена χ. Из рисунка хорошо видна постепенная деформация ореола по мере увеличения амплитуды смещения S_{α_0}.

Зависимости (77) и (78) характеризуют смещения остаточных ореолов рассеяния на склонах в пределах углов естественного откоса. Они нарушаются в условиях скального рельефа высокогорных районов, при наличии обвально-осыпных явлений, солифлюкционных террас и в районах, где наряду с плоскостной денудацией преобладает линейный снос, ведущий к образованию на склонах так называемых «деллей», или безрусловых ложбин стока. Зависимость S_{α_0} от квадрата мощности рыхлых образований, а с учетом местного коэффициента A, пропорционального величине $T_0 = \frac{h}{\Delta h}$, даже от куба их мощности, приводит к отступлениям от казалось бы очевидной прямой зависимости между крутизной склона и величиной смещения ореола. Причиной этого является увеличение мощности элювио-делювия и одновременно уменьшение ежегодного слоя денудации Δh при малых углах α, в результате чего рост Ah^2 может опережать убывание величины $\sin \alpha$ от крутых к более пологим склонам. Так, например, при угле наклона местности $\alpha \approx 12°$, $h=7{,}0$ и $\Delta h = 0{,}2$ мм/год, величина $\frac{h^3}{\Delta h}$ будет почти в 7000 раз больше того же показателя для крутого склона с углом $\alpha = 37°$, при $h=0{,}5$ м и $\Delta h = 0{,}5$ мм/год, в то время как $\sin \alpha$ в этом интервале углов возрастает только в три раза. Это хорошо объясняет «парадокс крутых склонов» — отсутствие заметных смещений вторичных ореолов рассеяния на очень крутых, активно денудируемых горных склонах. Малые величины A и h, даже при больших углах α, приводят в этих условиях только к ничтожным смещениям. Некоторые данные о смещениях ореолов рассеяния на склонах по нашим наблюдениям и публикациям других авторов приведены в табл. 14. Вязко-пластическое перемещение («дефлюкция») рыхлых обра-

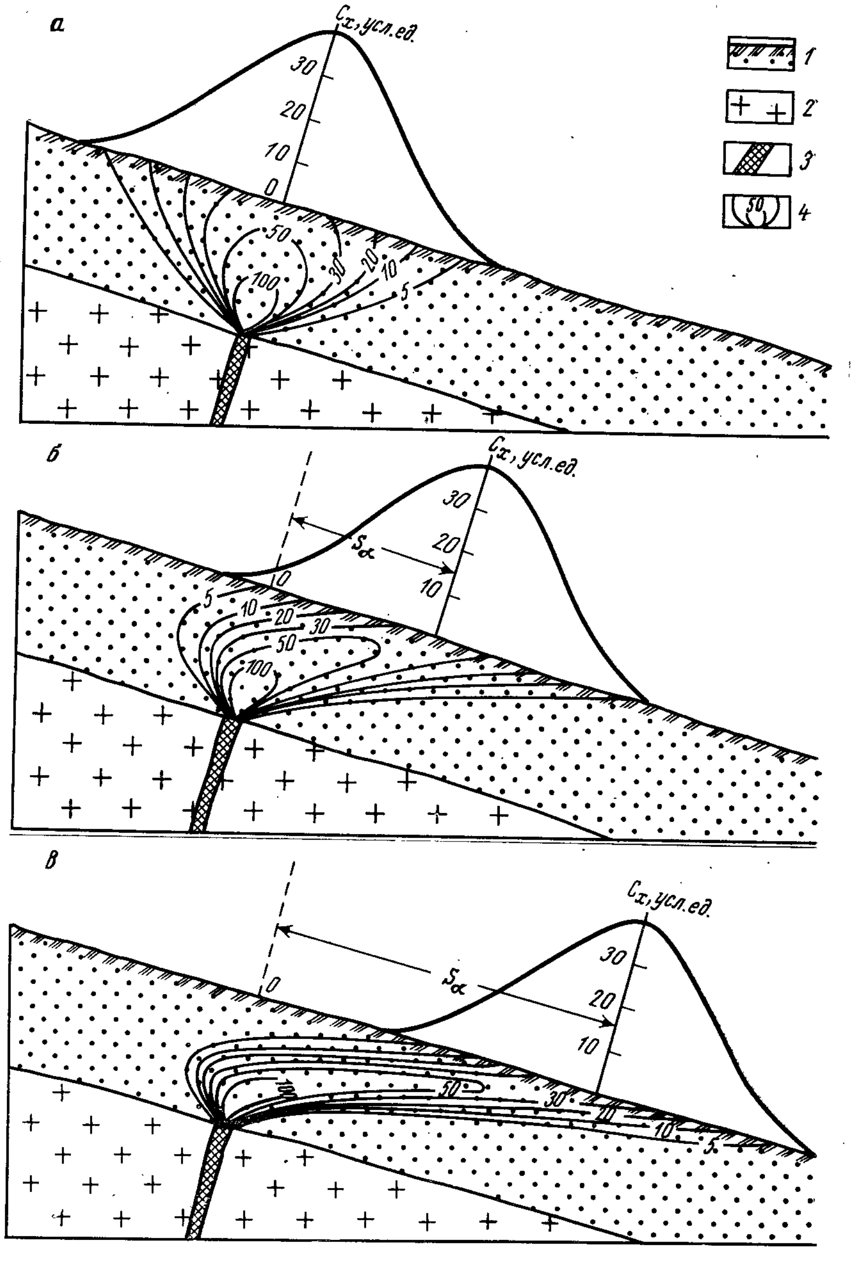


Рис. 43. Разрезы остаточных ореолов рассеяния (*а*, *б* и *в*) на склоне, соответственно, прн различных смещеннях: $S_{\alpha_0} = 0$, $S_{\alpha_0} = \frac{4}{3} h$ и $S_{\alpha_0} = \frac{8}{3} h$.

1 — элювио-делювий; *2* — рудовмещающие породы; *3* — рудное тело; *4* — изоконцентраты элемента в условных единицах

Таблица 14

Смещения ореолов рассеяния на гориых склонах [22, 25, 30]

Район	α, градус	h, м	S_{α_0}, м	Авторы
Центральный Казахстан	5—20	0,5—2,0	Очень мало	С. Д. Миллер, В. А. Клнчников н др.
Тянь-Шань	30—35	0,5	Нет	Б. А. Досанова, А. П. Соловов
Восточное Забайкалье	до 25—30	1,0—4,0	30—50	Е. М. Квятковский, И. Н. Крицук и др.; В. В. Поликарпочкин
Северное Забайкалье	Различные	?	До 80	М. П. Безверхний
Прибайкалье	Различные	?	До 200	Е. И. Загоскнна и др.
То же	До 35	1,5—2,0	Нет	В. Т. Кардаш, В. К. Маслов
Бурятская АССР	Крутые н умеренно крутые	?	250—300	В. Н. Тарасов
Чукотка	4—5	2—10	До 130—150	А. П. Соловов
Восточная Сибирь	15—18	2—3	20—30	Г. С. Вахромеев
Приморье	20—40	2—3	10—20	П. А. Куршев

зований приводит в нижней части склона к переходу остаточных ореолов рассеяния в погребенное состояние. В итоге помимо площади, занятой аллювиально-пролювиальными отложениями долин вдоль подножий склонов в полосе шириной S_{α_0}, вторичные ореолы рассеяния даже в горных районах могут развиваться по типу закрытых (рис. 44). Однако горным районам свойственно частое чередование интервалов открытых склонов с интервалами закрытых долин и подножий. В этих условиях, как показывают специальные расчеты, даже при закрытости 75 % вероятность пропуска крупных месторождений остается относительно малой и уменьшение числа выявляемых объектов происходит за счет мелких месторождений и непромышленных рудопроявлений. Глубинное геохимическое опоискование закрытых подножий горных склонов целесообразно только на стадии детальных работ в пределах рудных полей промышленных месторождений. Очень большие смещения ореолов рассеяния на склонах могут сделать ненадежным подсчет количества металла М в ореоле по профилю и оценку положения центральной точки ореола C_{max}, в связи с положением оси ореола в верхних горизонтах рыхлых образований почти параллельно профилю склона.

Выражения (74) и (78) учитывают раздельно смещения ореола рассеяния по восстанию рудного тела S_β при горизонтальной дневной поверхности и к подножию склона S_α, при условии падения рудного тела по нормали к склону. В практике необходима оценка общего смещения ореола рассеяния при пологом

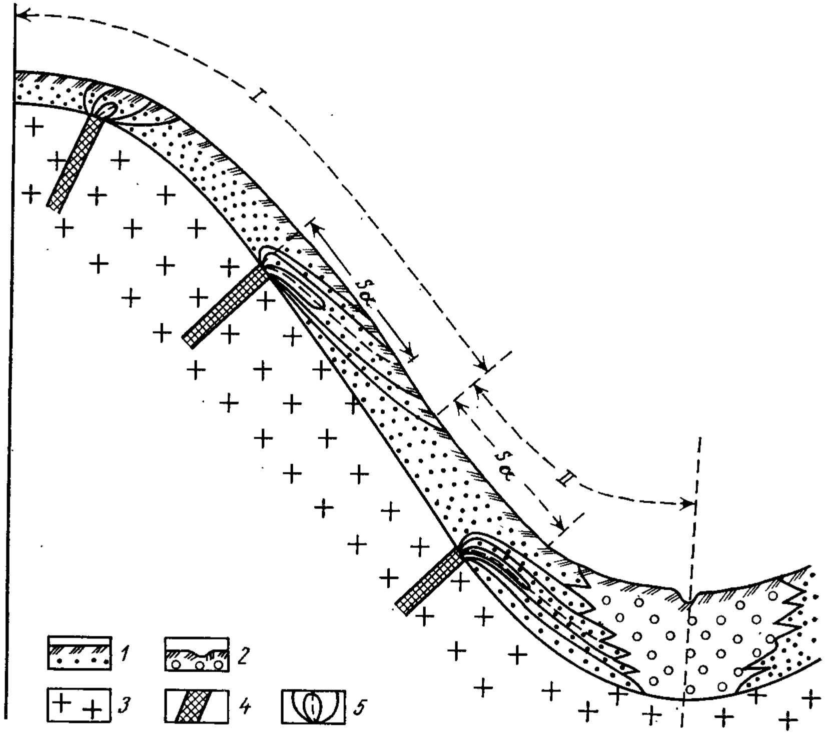


Рис. 44. Вторичные остаточные ореолы рассеяния на горном склоне.

1 — алювно-делювий; *2* — аллювий; *3* — рудовмещающие породы; *4* — рудное тело; *5* — вторичный ореол рассеяния, пунктиром показана ось ореола. Интервалы склона: I — ореолы открытого типа; II — ореол преимущественно закрытого типа

падении рудного тела и негоризонтальной дневной поверхности. Смещения ореола S_α и S_β носят направленный характер и являются векторными величинами. Каждое смещение не зависит от другого и общее смещение ореола S_Σ равно векторной сумме

$$\vec{S}_\Sigma = \vec{S}_\alpha + \vec{S}_\beta.$$

Здесь результирующая $\vec{S}_\Sigma$ — диагональ параллелограмма, построенного на составляющих S_α и S_β.

Для условий горного склона в выражении (74) изменяется смысл угла β, который следует отсчитывать не от горизонтальной поверхности, как это принято в горно-геологической практике, а от поверхности склона по линии профиля, направленного по нормали к простиранию рудного тела, принимая, что $\beta = 90°$, если рудное тело перпендикулярно к плоскости склона. Во всех случаях активно денудируемых склонов, где элювио-делювий представлен щебенистым материалом, значение параметра B, входящего в выражение (75), можно считать равным 1,0.

3.8. НАЛОЖЕННЫЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ

В отличие от остаточных ореолов рассеяния, образованных за счет интервалов рудной зоны, существовавших в их контуре до выветривания, вторичные наложенные ореолы рассеяния образуются в толще дальнеприносных (аллохтонных) отложений путем последующего диффузионного поступления рудных элементов из глубины. Математическое решение этой задачи уже в первом приближении требует рассмотрения двумерной модели $C_x = f(x, z)$ для значений $0 \leqslant h \geqslant h_0$, где h — глубина до источника рудных элементов; h_0 — мощность дальнеприносных отложений; z — глубина опробования. При литохимических поисках количественная интерпретация наложенных ореолов рассеяния не получила еще применения в связи с большим разнообразием трудно учитываемых условий, определяющих ее результат. Поэтому ограничимся рассмотрением только простейшей модели процесса.

Пусть под чехлом дальнеприносных отложений мощностью h_0 (рис. 45) залегает крутопадающее тело сульфидных руд, подвергающееся активному современному окислению у зеркала грунтовых вод, расположенного на глубине $h \geqslant h_0$ от дневной поверхности. Будем считать, что образование легкорастворимых вторичных минералов и отвод растворенных компонентов достигли регулярного режима и находятся в динамическом равновесии с процессами весьма медленной денудации дневной поверхности. Для простоты пренебрежем влиянием капиллярной каймы, всю толщу пород от поверхности до глубины h с точки зрения рассматриваемого процесса будем считать однородной и

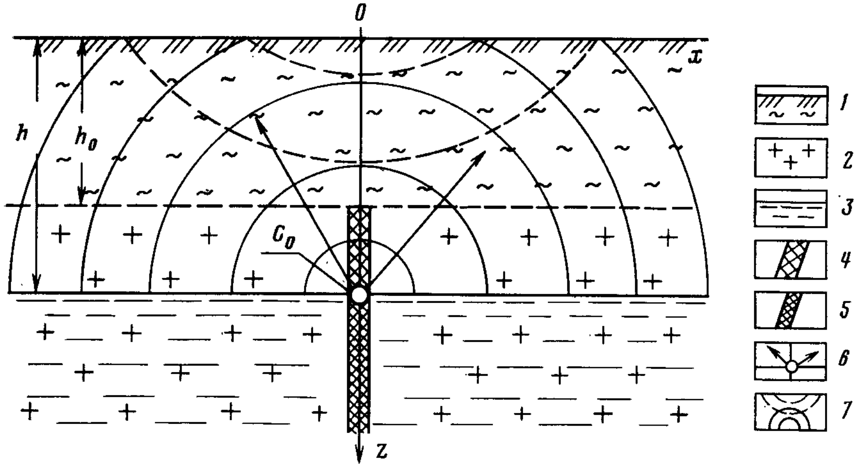


Рис. 45. Модель формировання наложенного диффузионного ореола рассеяния.

1 — дальнеприносные отложения; *2* — рудовмещающие породы; *3* — грунтовые воды; *4* — окисленные руды; *5* — сульфидные руды; *6* — источник раствора и направление диффузии; *7* — диффузионный ореол от действительного и фиктивного (пунктир) источников

изотропной, дневную поверхность и параллельное ей зеркало грунтовых вод примем горизонтальными. Последнее позволяет исключить из рассмотрения истечение минерализованных вод и ограничиться анализом диффузионного образования наложенного ореола рассеяния (см. рис. 28, тип II). Принятым условиям математической задачи отвечает рис. 45, на котором, в увязке с ранее рассмотренной схемой окисления сульфидного месторождения (см. рис. 31), по образующим цилиндра, вытянутого вдоль оси y, выделяется за единицу времени постоянное количество растворимых компонентов. Диаметр цилиндра, равный мощности рудного тела, по сравнению с глубиной его залегания примем пренебрежительно малым. Наличие земной поверхности, ограничивающей диффузию, определяет необходимость одновременно учитывать действие фиктивного источника, являющегося зеркальным отображением окисляющегося рудного тела. По В. С. Голубеву, диффузионное формирование ореола рассеяния в плоскости xOz от линейного источника, параллельного оси y, в однородной среде при отсутствии поглощения и наличии границы раздела «земля — воздух», подчиняется зависимости:

$$C_{xz} = -\frac{\theta}{4\pi D}\left\{\mathrm{Ei}\left[-\frac{x^2+(z-h)^2}{4DT}\right] + \mathrm{Ei}\left[-\frac{x^2+(z+h)^2}{4DT}\right]\right\}, \qquad (79)$$

где θ — «мощность» источника в кг/м·с; D — коэффициент диффузии; h — мощность перекрывающих отложений; T — время; Ei(U) — интегральная показательная функция от выражения, стоящего в скобках, значения которой табулированы в справочниках.

Решение задачи упрощается при $z=0$, что соответствует пробоотбору на дневной поверхности. В этом случае

$$C_x = \frac{\theta_0}{2\pi D}\,\mathrm{Ei}\left(-\frac{x^2+h^2}{4DT}\right)+C_ф. \qquad (80)$$

Для малых значений $\frac{x^2+h^2}{4DT}$ и соответственно больших T выражение (80) можно привести к виду

$$C_x = \frac{\theta_0}{2\pi D}\left[\ln\left(\frac{4DT}{x^2+h^2}\right)-C\right]+C_ф, \qquad (81)$$

где $C=0{,}5772\ldots$ — постоянная Эйлера [7].

График этой зависимости представляет собой симметричную кривую с одним максимумом в точке $x=0$, асимптотически приближающуюся к уровню геохимического фона. Расчеты, проведенные по этой формуле для больших значений T, характеризуют «столбообразную» форму наложенного ореола в вертикальном разрезе, что не противоречит имеющемуся опыту. Этим

наложенные ореолы рассеяния резко отличаются от остаточных, имеющих в разрезе веерообразную, расширяющуюся к дневной поверхности форму (см. рис. 38). Уравнения (79)—(81) характеризуют солевую составляющую литохимического ореола, в которой диффундирующий рудный элемент сохраняется в пленочной влаге, насыщающей дальнеприносные отложения. Эти растворимые компоненты способны к испарительной аккумуляции и сорбции у дневной поверхности, а также к различным обменным химическим реакциям с переходом в твердую фазу, что, естественно, приводит к отступлениям от приведенных зависимостей.

В природных условиях формирование наложенных ореолов рассеяния дополнительно осложняется биогенными процессами и горизонтально-слоистым характером перекрывающих отложений с переменными значениями коэффициента диффузии. Аналитическое решение задачи в этих условиях становится невозможным, и для моделирования наложенных ореолов рассеяния требуется использование численных методов и ЭВМ.

На рис. 46 показан вертикальный разрез и график наложенного ореола рассеяния, рассчитанного для упрощенной модели. По условию рудный элемент аккумулируется у дневной поверхности и в одном из литологических горизонтов чехла. По данным Г. Н. Засухина, весьма четкий открытый диффузионный ореол рассеяния молибдена (и менее четкий Cu, Pb) был установлен над медноколчеданным месторождением Макан при мощности перекрывающих юрских отложений до 30 м. Наложенный ореол рассеяния Cu, Ba, Ag, Pb, Ni и Co при мощности перекрывающих палеоген-неогеновых и четвертичных глин 15—75 м выявлен над медноколчеданным месторождением «Имени XIX

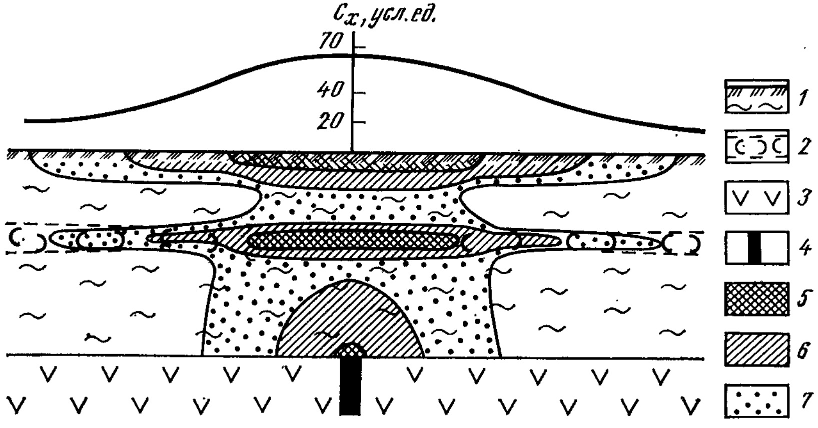


Рис. 46. Расчетиая модель наложенного ореола рассеяния и графнк наземной съемки.

1 — дальнеприносные отложения; 2 — горизонт аккумуляции рудного элемента; 3 — рудовмещающие породы; 4 — рудное тело. Значения концентраций рудного элемента — в условных единицах: 5 — >50; 6 — от 30 до 50; 7 — от 20 до 30

Партсъезда» (Челябинская область). На Гайском медноколчеданном месторождении, по данным М. А. Глазовской, при мощности юрских глин, песков, конгломератов и неоген-четвертичных суглинков до 70—100 м, открытый наложенный ореол рассеяния меди площадью около 1,5 км^2 с содержанием до 1,0 % Cu был обнаружен в 2—2,5 км к юго-востоку от 5-ой рудной залежи. Эта уникальная лито- и гидрохимическая аномалия обязана выходу на поверхность высокоминерализованных сульфатных вод, образующих здесь широко известное «купоросное озеро». В отличие от собственно диффузионных, этот ореол должен быть отнесен к более редкому типу «гидроморфных», образуясь в условиях разгрузки ореольных вод в современную гидросеть. Эти данные подтверждают возможность образования наложенных солевых ореолов рассеяния диффузионного (и более сложного) типа над месторождениями сульфидных (колчеданных) руд при наличии чехла дальнеприносных отложений мощностью до 30—50 м и даже более 100 м. В противоположность этому, по данным В. А. Бугрова, двухметровый слой неогеновых глин в ландшафтах сухих степей полностью экранирует остаточные ореолы рассеяния Mo и W над редкометальным прожилкововкрапленным (штокверковым) оруденением в гранитоидах, и образование наложенного ореола захватывает только 0,5—0,6 м чехла. А. С. Миляев и А. Н. Фокин считают 3 м чехла предельной мощностью для образования открытых наложенных ореолов рассеяния урано-молибденовых месторождений в ландшафтах сухих степей Северного Казахстана. Все приведенные данные относятся к результатам прямого спектрального (валового) анализа проб. В целом обнаружение вторичных наложенных ореолов рассеяния над погребенными месторождениями при литохимических съемках по стандартной методике с валовым анализом проб не может быть гарантировано уже при мощности дальнеприносных отложений, измеряемой первыми метрами.

По данным Ю. Н. Юшкова, литохимические съемки с анализом кислотных вытяжек из проб [25] позволяют в условиях восточного склона Урала обнаруживать диффузионные наложенные ореолы рассеяния медноколчеданных месторождений при мощности чехла 25—35 м, против 5—7 м при валовом спектральном анализе. Л. В. Антропова считает возможным выявление наложенных ореолов рассеяния над медно-никелевым оруденением в докембрийском фундаменте Воронежской антеклизы, по селективно извлекаемым металлоорганическим соединениям меди, при мощности перекрывающих палеозойских и более молодых осадков до 100—140 м [2] (подобные ореолы, вероятно, принадлежат к III типу). Специальные исследования наложенных ореолов рассеяния погребенных сульфидных месторождений с анализом на сумму металлов ацетатно-буферных вытяжек провел Ю. Е. Сает. По данным опубликованной им сводки, вторичные ореолы рассеяния в почвах с применением соответствующих вытяжек наблюдались различными авторами при мощности перекрывающих отложений от 8—10 до 100—130 м [33]. Задачи выявления слабых геохимических аномалий решаются также методом извлечения и анализа термомагнитных фракций, предложенным Н. А. Ворошиловым, и методом частичного извлечения металла (ЧИМ). Возможность выявления с поверхности вторичных наложенных ореолов рассеяния над погребенными месторождениями путем избирательного (частично-фазового) анализа проб в принципе не вызывает сомнений.

Прямым методом повышения контрастности весьма слабых наложенных ореолов рассеяния является специальная математическая обработка на ЭВМ данных обычного («валового») анализа проб. По минимальным затратам времени и средств такая обработка поисковых геохимических данных всегда предпочтительна по сравнению с любым селективным анализом проб, как правило трудоемким и дорогостоящим.

Известно, что конфигурация и размеры слабых геохимических аномалий целиком зависят от техники геохимических съемок. Легко допустить, что взамен внешней изолинии 20 усл. ед., которая на рис. 46 оконтуривает наложенный ореол рассеяния, при другой технике работ этот же ореол мог быть оконтурен на нижнем уровне 30 усл. ед. В этом варианте геохимическая аномалия в разрезе чехла разделилась бы на три разобщенных контура — у дневной поверхности, на уровне благоприятного литолого-стратиграфического горизонта и на глубине, в зоне, прилегающей к рудному телу. По принятой классификации такой ореол из II типа перешел бы в III тип, с перспективой его ошибочного отнесения к числу безрудных («зависших») аномалий. Но не только конфигурация, сама возможность обнаружения наложенного ореола рассеяния над погребенным месторождением решающим образом зависит от техники поисковых съемок.

Реально существующая слабая аномалия не будет обнаружена, если показатель ее контрастности $\gamma < 1{,}0$, и простым сгущением сети пробоотбора (при стандартной методике поисковых съемок) это положение исправить нельзя. В этих условиях слабая аномалия скрыта за уровнем шума, для ее выявления необходимо повысить амплитуду аномалии и снизить уровень помех. Эта задача имеет общетехническое значение и для ее решения существует множество способов.

Простейшим методом снижения уровня случайных природных и технических помех является сглаживание данных способом «скользящего среднего», с числом точек в окне n, близким к их числу в контуре ожидаемой слабой аномалии. В этом случае регулярная составляющая поля (полезный сигнал) сохраняет свою амплитуду, а случайная составляющая (помеха) уменьшается в $\sqrt{n}$ раз, в итоге показатель контрастности слабой аномалии возрастает в такое же число раз. Поскольку рудные литохимические аномалии неизменно являются комплексными,

аналогичное увеличение их контрастности достигается путем перемножения (мультипликации) содержаний m элементов типоморфного комплекса. В слабых аномалиях превышения содержаний отдельных элементов относительно их фона соизмеримы между собой, поэтому амплитуда мультипликативной аномалии возрастает примерно в m раз. Одновременно стандартное отклонение мультипликативного фона, согласно теореме о сложении дисперсий, увеличивается только в $\sqrt{m}$ раз и контрастность мультипликативной аномалии возрастает в такое же число раз. В результате сочетания мультипликации и сглаживания показатель контрастности новой аномалии γ^* возрастает в $\sqrt{mn}$ раз по сравнению с контрастностью исходных моноэлементных аномалий γ_0, или

$$\gamma^* = \gamma_0 \sqrt{mn}. \qquad (82)$$

Это выражение характеризует в о з м о ж н о е у с и л е н и е слабой аномалии при полной независимости случайных помех, в действительности оно меньше в силу их сложной корреляционной зависимости между собой для разных элементов и наличия радиуса автокорреляции, соизмеримого с шагом пробоотбора. С учетом этого можно только ориентировочно оценить, какими должны быть значения m и n, чтобы предельно слабые моноэлементные аномалии с показателем контрастности $0<\gamma_0<1{,}0$ после мультипликации и сглаживания исходных данных образовали новую аномалию с контрастностью $\gamma^* \geqslant 3{,}0$. Согласно (82) и заданной величине имеем:

$$mn = \left(\frac{\gamma^*}{\gamma_0}\right)^2 \geqslant \frac{9}{\gamma_0^2}. \qquad (83)$$

Для случая $\gamma_0=0{,}4$ находим $mn>56$. Этому условию при мультипликации содержаний пяти рудных элементов будет ориентировочно удовлетворять сглаживание с 15 точками в окне (например, три профиля по пяти точкам на профиле), поскольку $5 \cdot 15=75>56$. При $\gamma_0=0{,}3$ и мультипликации содержаний шести элементов размер скользящего окна целесообразно принять 3×7 точек (или больше, если это не противоречит размеру ожидаемой аномалии). Так как γ_0 остается неизвестным, приведенные расчеты имеют только ориентирующее значение. В практике целесообразно многократное усреднение с малыми окнами (например $n=2$), применение нелинейных «окон», критерия оптимальности и т. п. [20]. Выбор рудных элементов для мультипликации определяют их максимальные кларки концентрации в рудах по сравнению с местным фоновым содержанием в породах чехла. В знаменатель мультипликативного показателя могут вводиться элементы и со значениями $К_к \ll 1{,}0$ т. е. находящиеся в резком дефиците в рудах. С целью подавления безрудных ландшафтных аномалий, осложняющих выявление наложенных

ореолов рассеяния погребенных месторождений, в знаменатель геохимического показателя могут также вводиться элементы, не являющиеся типоморфными для ожидаемого оруденения. Однако число и смысл химических элементов, образующих мультипликативный показатель, должны тщательно контролироваться. Это положение иллюстрируют специальные номограммы для оценки полезности мультипликации. Некритическое перемножение содержаний большого числа химических элементов без учета их «вклада» в наложенный ореол (рис. 47) и величины максимальной контрастности моноэлементных аномалий способно принести только вред.

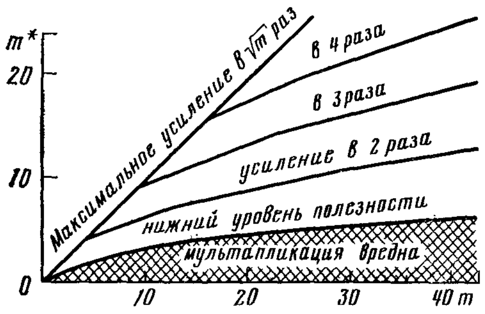


Рис. 47. Номограмма для оценки результатов мультипликации.

m — число мультиплицируемых элементов; $m^* \leqslant m$ — число элементов, дающих вклад в слабую аномалию; $\gamma_{m^*}=1{,}0$; $\gamma_{m-m^*}=0$

И. Ф. Мясников в результате обработки на ЭВМ по программам Ю. В. Шварова данных наземной литохимической съемки масштаба 1 : 25 000—1 : 50 000 выявлял наложенные ореолы рассеяния над погребенными колчеданно-полиметаллическими месторождениями Рудного Алтая (РСФСР) при мощности чехла более 100 м. Мультиплицировались содержания Pb, Zn, Cu, Ag и Ba по данным обычного спектрального анализа, сглаживание проводилось по 15—21 точкам в скользящем окне. По первичным данным ореолы не выявлялись. При необходимости обработки на ЭВМ могут подвергаться данные частично фазового анализа геохимических проб, что способно повысить глубинность поисков, достигнутую при раздельном применении математического метода и селективного извлечения металлов.

3.9. ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ОРЕОЛОВ И ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ

В профиле горного склона выделяются следующие пять интервалов (рис. 48): I — плоский водораздел; II — выпуклый склон; III — плоский склон; IV — вогнутый склон, переходящий в долину V. В зависимости от местных форм рельефа в профиле склона между водоразделом и долиной может преобладать только один из интервалов — выпуклый, плоский или вогнутый, образуя различные типы склонов. Для молодых горных стран характерны V-образные долины с крутыми плоскими и выпуклыми склонами. Для районов с «дряхлыми» формами рельефа более характерны пологие плоские и U-образные вогнутые склоны, приближающиеся к профилю равновесия, и т. п.

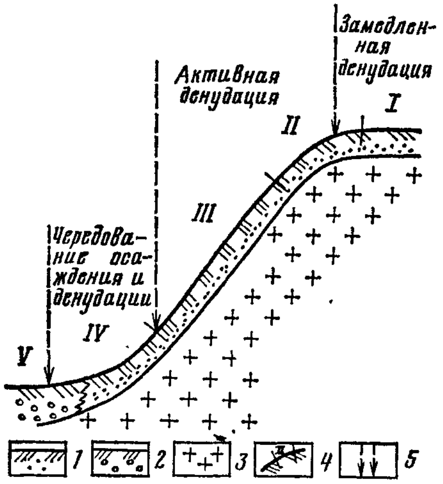


Рис. 48. Обобщенный профиль горного склона.

1 — элювио-делювий; *2* — аллювий; *3* — коренные породы; *4* — границы интервалов склона; *5* — границы поясов. Римскими цифрами обозначены интервалы горного склона

При выпадении атмосферных осадков часть влаги подвергается инфильтрации (просачиванию) в толщу горных пород. Если интенсивность выпадения атмосферных осадков превышает инфильтрацию, вслед за образованием слоя поверхностного задержания возникает волнообразное (пульсирующее) поверхностное стекание осадков. В зависимости от объема и живой силы поверхностное стекание способно совершать различную денудирующую работу. Вблизи плоского водораздела скорость и объем поверхностного стекания приобретают достаточную величину для отрыва и переноса частиц только в случае наиболее интенсивных ливневых осадков. Это определяет существование пояса замедленной денудации, охватывающего I и часть II интервала склона. В более крутой части склона живая сила поверхностного стекания возрастает, возможность отрыва и переноса частиц возникает уже при меньшей интенсивности выпадения осадков, образуя пояс активной денудации, охватывающий часть II и весь III интервал склона. В пределах первых трех интервалов склона отложения переносимого материала не происходит, так как масса воды *m*, участвующей в поверхностном стекании, непрерывно возрастает от водораздела к подножию склона, пропорционально длине горизонтального продолжения склона, а скорость стекания возрастает или остается постоянной. Непрерывное увеличение живой силы поверхностного стекания $\frac{mv^2}{2}$ допускает дальнейшее насыщение воды переносимым материалом путем отрыва от поверхности склона все новых и новых частиц. При переходе к вогнутой части склона скорость поверхностного стекания замедляется. Если при этом интенсивность выпадения атмосферных осадков невелика, живая сила поверхностного стекания падает, и наступает осаждение части переносимого материала. При интенсивных ливневых осадках возрастание объема поверхностного стекания даже в пределах вогнутого склона может перекрывать убывание скорости стекания, и тогда осаждение уступает место денудации. Поэтому вогнутый интервал склона IV является поясом чередования отложения и денудации. В долине поверхностное (склоновое) стекание переходит в русловой сток (временный или постоянный), в процессе которого материал, снесенный со склона, смешивается с материалом, поступившим по руслу.

На плоских и выпуклых склонах, имеющих широчайшее распространение, денудация протекает без попутного отложения сносимых в долину продуктов выветривания. На таких склонах график литохимического ореола подчиняется обычной функции рассеяния, сохраняя симметричный, быстроубывающий вид. Уже на расстоянии от центральной точки ореола, равном $\pm 3\sigma$, надфоновое содержание металла в поле рассеяния падает до 1/100 C_{max} и далее практически становится фоновым. В том же сечении надфоновое содержание в аллювиальном потоке рассеяния, согласно (32), составит P/S_x и может многократно превышать нижнее аномальное. После фоновых содержаний металла на склоне содержание металла в потоке рассеяния C_x' вновь возрастает, и никакого непрерывного, постепенного убывания содержаний рудных элементов от центра ореола в сторону ближайшей точки потока рассеяния на плоских или выпуклых склонах не наблюдается (рис. 49).

Иное дело, если профиль склона вогнутый. В этих условиях оторванные от поверхности склона в зоне ореола рудные частицы могут быть осаждены гипсометрически ниже по склону. За время между предыдущим и более активным следующим воздействиями денудации осажденные частицы рудных минералов рассеиваются в толще рыхлых отложений и весь интервал

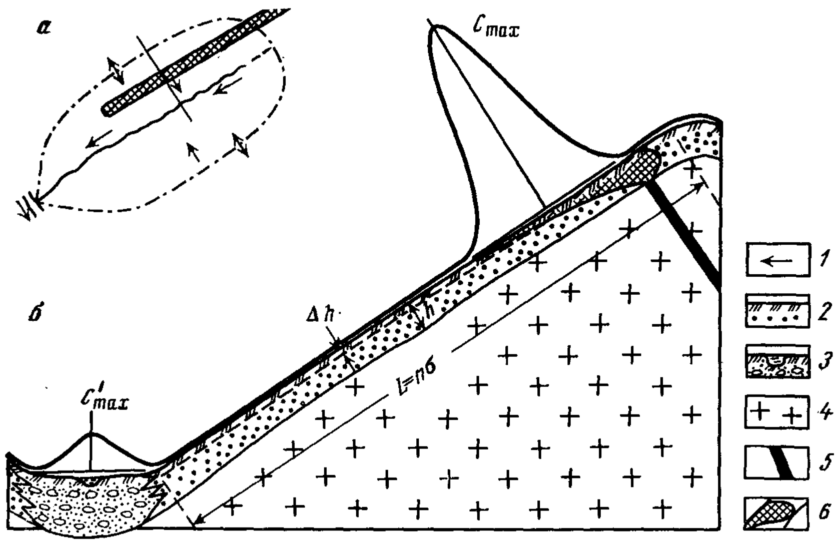


Рис. 49. Взаимоотношения ореола и потока рассеяния при плоском склоне долины.

а — план местности; *б* — разрез по нормали к склону. *1* — направление стока; *2* — элювио-делювий; *3* — аллювий; *4* — коренные породы; *5* — рудное тело; *6* — вторичный ореол рассеяния ($3<n<125$)

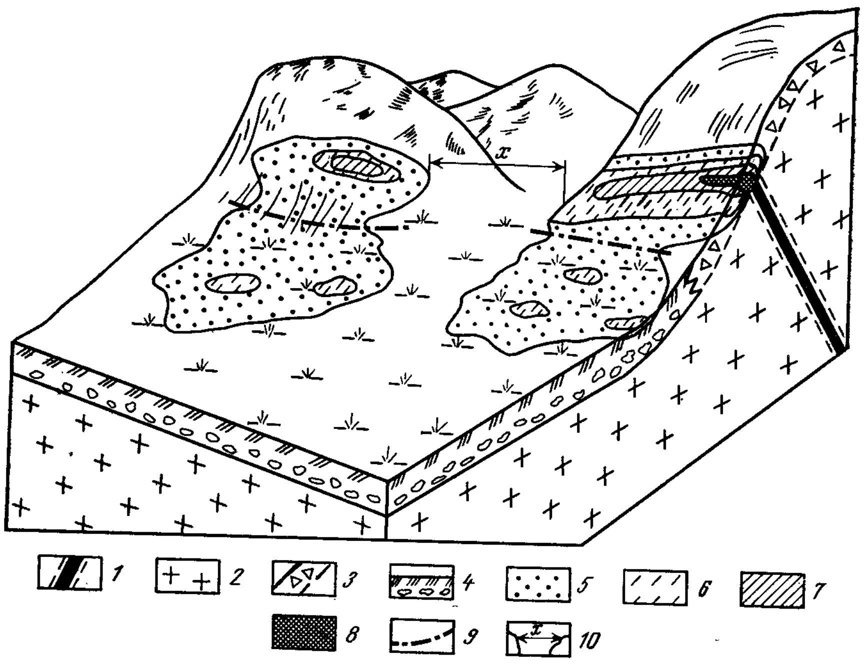


Рис. 50. Шлейфы ореолов рассеяния на вогнутом склоне.

1 — рудное тело и его первичный ореол; *2* — рудовмещающие породы; *3* — элювио-делювиальные образования; *4* — аллювиально-пролювиальные отложения. Изоконцентрации рудного элемента в условных единицах: *5* — от 1 до 3; *6* — от 3 до 10; *7* — от 10 до 30; *8* — >30; *9* — граница между остаточным ореолом рассеяния и его шлейфом; *10* — интервал перехода остаточного ореола рассеяния в погребенное состояние

склона ниже центральной точки ореола постепенно, на ту или иную глубину, приобретает аномально высокое содержание металла. В результате график ореола рассеяния на вогнутом склоне имеет асимметричный вид, и всю поверхность склона ниже центральной точки ореола следует рассматривать в качестве области аномальных содержаний металла, занимающей промежуточное положение между ореолом и потоком рассеяния. В практике литохимических поисков ее принято именовать «шлейфом ореола», определяющим меру его асимметрии. Содержания металла в пределах шлейфа постепенно и незакономерно убывают в сторону русла, они могут непосредственно смыкаться с аномальными содержаниями металла в потоке рассеяния или отделяться от них интервалом фоновых содержаний.

Пример типичных шлейфов, сопровождающих вторичные остаточные ореолы рассеяния рудных тел, показан на схематическом рис. 50. В основе его лежат реальные данные о распределении свинца, выявленные литохимической съемкой масштаба 1 : 10 000 на участке Беркара (Центральный Казахстан) [42]. При оценке прогнозных ресурсов и других параметров аномальные содержания металлов в шлейфах ореолов в подсчет продуктивности вторичных остаточных ореолов рассеяния включать нельзя.

3.10. РЕШЕНИЕ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Прямая задача литохимических поисков отвечает формулировке: рассчитать ожидаемый вид вторичного ореола рассеяния по заранее заданным параметрам рудного тела и местным геохимическим коэффициентам. Необходимость в этом возникает, например, при оценке минимальных размеров рудных тел, доступных для обнаружения при заданных параметрах геохимического фона и данной технике работ. Эта задача решается вполне однозначно.

Обратная задача поисковой геохимии связана со значительно более трудной проблемой: по характеристике выявленного вторичного ореола рассеяния рассчитать ожидаемые параметры рудного тела, которое образовало данный ореол. Решение этой задачи является важнейшим итогом литохимических поисков, определяя их геологические результаты. Подобно решениям других обратных задач, найденные оценки параметров рудного тела не являются единственными.

Для расчета графика ожидаемого вторичного ореола рассеяния по профилю служат теоретические зависимости (55) и (59), если заранее заданы мощность рудного тела $2p$ и содержание металла в рудах $C_р$, а из опыта работ в том же районе или в сходных условиях известны местные значения k и σ. В этом случае максимальное содержание металла за вычетом фона в ореоле «тонкого» рудного тела, ограниченного условием $2p < 2{,}5\sigma$, найдем из выражения

$$C_{max} = \frac{kC_р 2p}{2{,}5\sigma}. \tag{84}$$

Содержание металла в остальных «особых» точках ореола, по аналогии с оценкой коэффициента рассеяния «методом трех уровней» (см. рис. 37), найдем через C_{max} по табулированным значениям функции рассеяния. По приведенным в табл. 15 точкам можно полностью построить график ожидаемого ореола рассеяния в одном из общепринятых масштабов, выбирая его из соотношений $\sigma \approx 1{,}0$ см, $C_{max} \approx 5$—6 см.

Для мощного рудного тела при $2p > 2{,}5\sigma$, значения C_x для пяти-шести точек одной из ветвей ореола найдем по формуле (59), используя значения интеграла вероятностей, умножая вычисленные значения на k и прибавляя $C_ф$.

На рис. 51 показан пример таких расчетов для трех рудных тел различного размера, схематизирующих «основные» залежи крупного, среднего и мелкого месторождений свинцовых руд в горно-луговых ландшафтах выровненных водоразделов Заи-

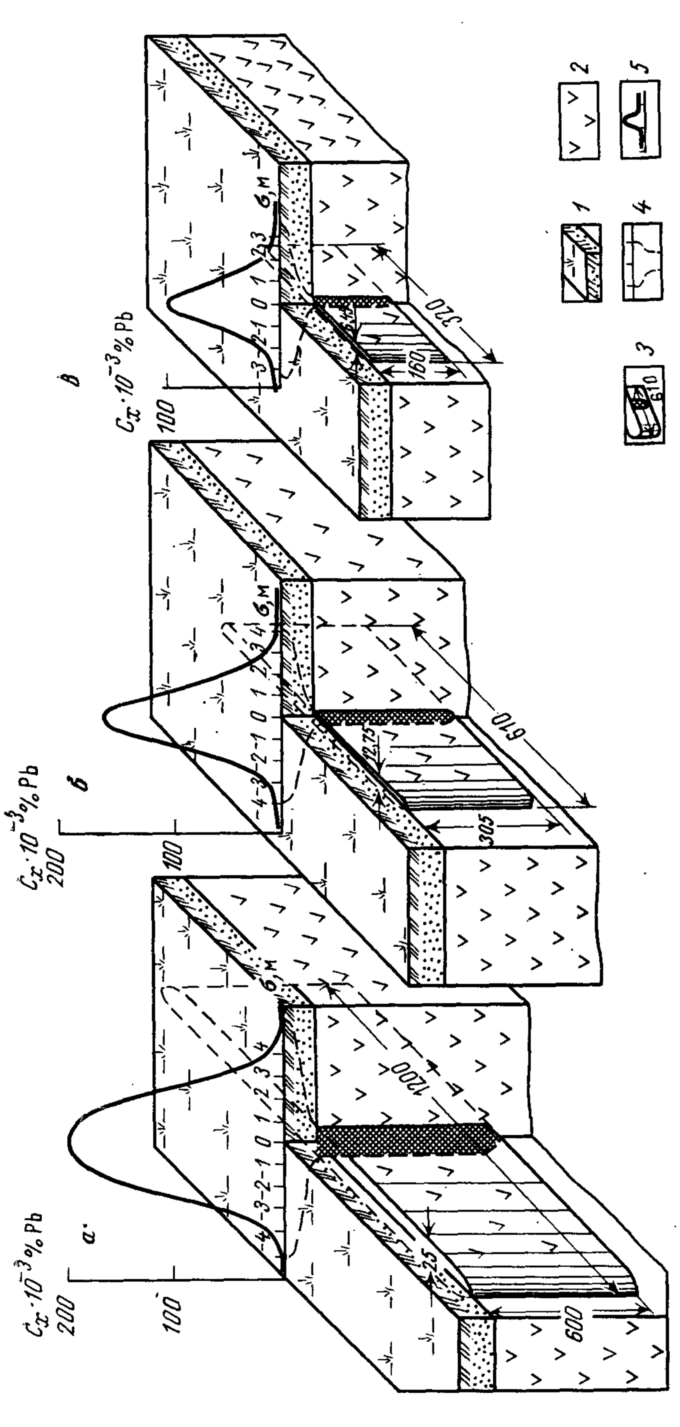


Рис. 51. Решение прямой задачи для крупного (*а*), среднего (*б*) и мелкого (*в*) месторождений свинцовых руд в ландшафтах выровненных водоразделов Заилийского Алатау [25].

1 — элювий с хорошо развитыми горно-луговыми почвами; 2 — рудовмещающие силикатные породы; 3 — рудное тело (C_p=2 % Pb, k=0,1, σ=5 м), размеры в метрах; 4 — условный контур вторичного ореола рассеяния в разрезе; 5 — теоретический график содержаний свинца в ореоле

Таблица 15

К расчету ореола рассеяния

Номер точки	x, м	C_x, усл. ед.	Номер точки	x, м	C_x, усл. ед.
0	0,0	$C_{max}+C_ф$	1	$\pm0{,}5\sigma$	$0{,}883\,C_{max}+C_ф$
2	$\pm1{,}0\sigma$	$0{,}607\,C_{max}+C_ф$	3	$\pm1{,}5\sigma$	$0{,}325\,C_{max}+C_ф$
4	$\pm2{,}0\sigma$	$0{,}135\,C_{max}+C_ф$	5	$\pm2{,}5\sigma$	$0{,}043\,C_{max}+C_ф$
6	$\pm3{,}0\sigma$	$0{,}011\,C_{max}+C_ф$	Все прочие	$\pm\infty$	$C_ф$

лийского Алатау. В качестве исходных данных были приняты содержания металла в рудном теле C_p=2,0 % Pb (рядовые руды), форма рудных тел — крутопадающие пластовые (линзообразные) залежи, являющиеся геометрическими фигурами подобия для месторождений различных классов крупности в системе десятичной классификации по запасам. Из опыта работ в районе местный коэффициент рассеяния для свинца был принят σ=5,0 м и коэффициент пропорциональности k=0,1, отвечающий характерным для данных ландшафтов ослабленным ореолам рассеяния Pb. Расчеты для крупного месторождения проводились по формуле (59), для мелкого — по формуле (55) и данным табл. 15, для среднего по масштабу месторождения — по обеим формулам, показавшим хорошую сходимость [25]. Теоретический график ореола рассеяния Pb для среднего по масштабу запасов объекта (см. рис. 51, *б*) достаточно близко совпадает с реальным вторичным ореолом рассеяния полиметаллического месторождения Чинасылсай, находящегося в том же районе. Вертикальные разрезы теоретически рассчитанного (*а*) и реального (*б*) вторичных ореолов рассеяния показаны на рис. 52 для случая близких по виду зависимостей $M_z=f(z)$ и падений рудных тел, отклоняющихся от вертикального. Сходство ореолов рассеяния (*а*) и (*б*) вполне очевидно, что доказывает правильность найденных теоретических законов их формирования.

Аналитическое решение прямой задачи по формулам становится весьма громоздким для сложных рудных зон с неоднократно изменяющимся средним содержанием металла в рудах, сопровождаемых первичным ореолом и промежутками «пустых» пород. Расчет ожидаемого графика вторичного ореола рассеяния для сложных рудных зон производится с помощью предложенной Р. И. Дубовым специальной линейки. Для детального изображения ожидаемого ореола рассеяния в плане, в изоконцентрациях, оконтуривающих заданное оруденение, служит рассчитанная Р. И. Дубовым круговая палетка [42].

По теоретически рассчитанным графикам и картам изоконцентраций ореолов рассеяния с учетом параметров местного гео-

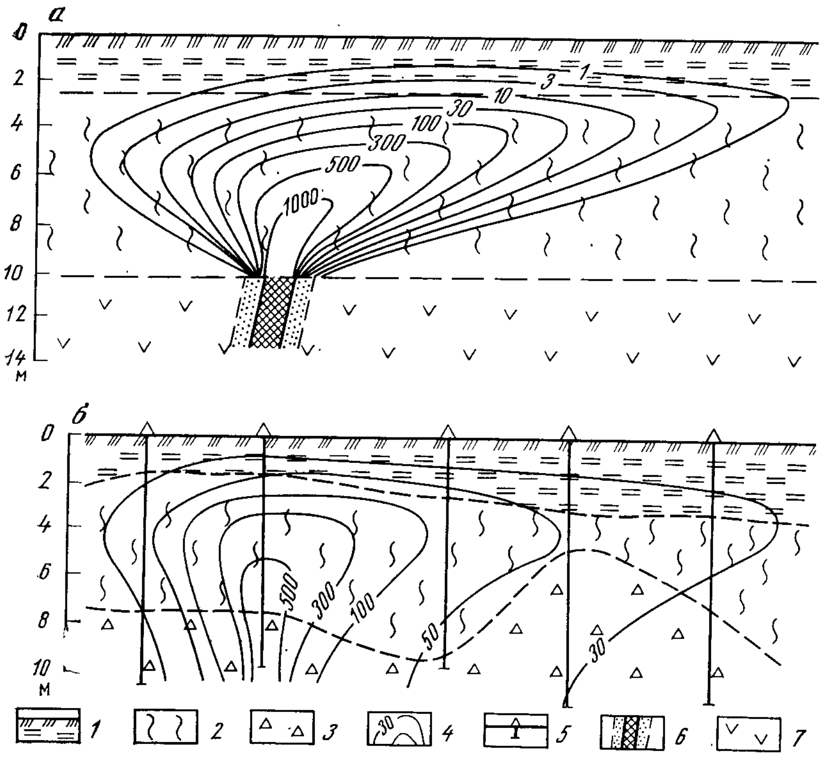


Рис. 52. Вертикальные разрезы расчетного (*а*) и реального (*б*) вторичных ореолов рассеяния.

1 — перекрывающие четвертичные отложения. Кора выветривания: *2* — глинистая; *3* — щебенистая; *4* — изоконцентраты в условиых единицах; *5* — буровые скважины; *6* — рудное тело; *7* — рудовмещающие породы

химического фона производится оценка их эффективных размеров, контрастности и других показателей, важных для обоснования методики поисковых работ. Успешное решение прямых задач является одним из доказательств возможности количественной интерпретации вторичных ореолов рассеяния, т. е. решения разнообразных обратных задач. Подсчеты продуктивности остаточного ореола рассеяния с учетом местного коэффициента пропорциональности характеризуют количество металла в коренном выходе оруденения безотносительно к его нахождению в богатых или в бедных (некондиционных) рудах и в первичном ореоле залежи, что, естественно, очень важно. Поэтому для оценки выявленных ореолов рассеяния имеет значение раздельное определение мощности рудной зоны $2p$ и среднего содержания в ней металла $C_р$ еще до перехода к разведочным работам. В случае «тонких» рудных тел ($2p<2{,}5\sigma$), согласно «принципу эквивалентности», эта задача является неразрешимой. Для мощ-

ных рудных зон действие принципа эквивалентности прекращается и для тел простой формы раздельное определение $C_р$, $2p$ и σ по остаточным ореолам рассеяния возможно с помощью интерпретационных палеток, предложенных Р. И. Дубовым [20].

Для численного решения этой же задачи Е. М. Квятковский предложил специальную номограмму [22]. К интерпретации многовершинных, сложных, неправильной формы графиков или изометрических в плане ореолов рассеяния палетки и номограмма непригодны. Количественная интерпретация остаточных ореолов рассеяния с помощью палеток или номограммы, несомненно, полезна, но она не может заменить бороздового опробования руд в коренном залегании.

Завершается геологическая, геохимическая и физико-математическая интерпретация вторичных ореолов рассеяния оценкой выявленных объектов в цифрах прогнозных ресурсов металла, определяющей эффективность поисковых работ и составляющей основное содержание обратной задачи поисковой геохимии. Решающее значение для этих оценок имеет анализ генетического типа и геолого-структурных условий локализации оруденения. Здесь мы ограничимся рассмотрением тех случаев, когда по геолого-структурным условиям характеристика масштаба оруденения на поверхности рудовмещающих пород отвечает его промышленной оценке. К числу таких объектов относятся рудопроявления и месторождения относительно простой формы, вскрытые современным или более древним эрозионным срезом на уровне промышленных горизонтов оруденения (не слепые) — пластового, линзообразного, жильного или штокверкового типа. Выходы рудных тел на поверхность рудовмещающих пород, как правило, частично или полностью перекрыты продуктами выветривания, затрудняющими или исключающими их прямую оценку. Объективным показателем оценки масштаба коренного оруденения служит площадная продуктивность его элювио-делювиального ореола рассеяния P м^2%. Располагая данными о величине местного коэффициента остаточной продуктивности k, можно еще до производства горных работ оценить количество металла (в т/м) в коренном оруденении:

$$q_р = \frac{P}{40k} = \frac{1}{k} q. \qquad (85)$$

Исходя из этого прогнозные ресурсы металла могут быть подсчитаны на глубину H в соответствии с геологическими представлениями о вероятной форме, уровне эрозионного среза и условиях залегания рудных тел:

$$Q_H = \frac{1}{k} qH. \qquad (86)$$

Количество металла в остаточном ореоле P в м^2% или q в т/м характеризует выход рудной зоны на видимую мощность в плос-

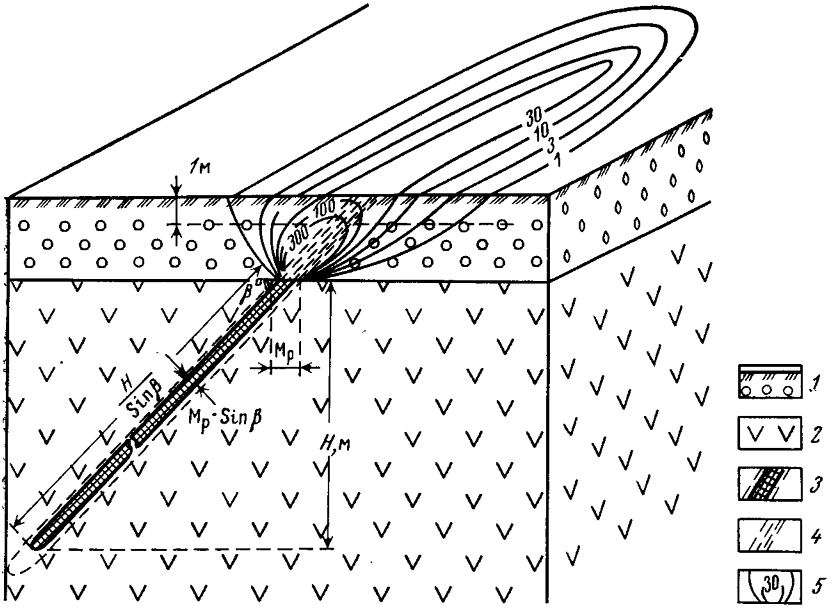


Рис. 53. К оценке прогнозных ресурсов металла по вторичному остаточному ореолу рассеяния.

1 — элювий; *2* — рудовмещающие породы; *3* — рудное тело и его первичный ореол; *4* — интервал рудного тела, существовавший до выветривания; *5* — изоконцентраты содержания металла в ореоле рассеяния на поверхности и в разрезе в условных единицах

кости наблюдения. Это не влияет на результат подсчета Q_H, если глубина H принимается по нормали к этой плоскости, как это следует из рис. 53. Если же при относительно пологом залегании рудной зоны глубина подсчета H принимается по падению, величину q необходимо привести к истинной мощности.

Результаты подсчета прогнозных ресурсов Q_H по формуле (86) отражают общее количество металла без учета его кондиционного или некондиционного содержания в породах и рудах. Между тем та или иная часть этого металла, очевидно, сосредоточена за пределами контура промышленных руд. Геологические и геохимические принципы выбора целесообразных глубин подсчета прогнозных ресурсов и поправочных множителей для перехода от геохимических к ожидаемым кондиционным ресурсам металла в зависимости от типа месторождений, рассматриваются в гл. 6. Прогнозные ресурсы, подсчитанные по параметрам вторичных остаточных ореолов рассеяния, в зависимости от масштаба литохимических съемок и геологической изученности выявленного оруденения, согласно данным табл. 9, подлежат отнесению к категориям P_2 или P_1.

Глава 2

ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ПОТОКИ РАССЕЯНИЯ

2.1. ТВЕРДЫЙ И РАСТВОРИМЫЙ СТОК С СУШИ

Часть земной коры, образующая сушу, во все периоды геологической истории Земли являлась ареной развития взаимосвязанных процессов выветривания и денудации. Формируя гипергенное поле рассеяния месторождений полезных ископаемых, эти процессы определяют развитие важнейших для практики поисков вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния месторождений. Масштабы денудационных процессов, под которыми понимается удаление и перенос продуктов выветривания в зону осадкообразования, характеризуются многочисленными данными геологии, физической географии и гидрологии.

Из 510 млн. км² поверхности земного шара современная суша занимает 29 %, или 149 млн. км². Только 0,8 млн. км² земной поверхности лежит ниже уровня моря. Средняя высота суши составляет 875 м, с разнообразными чередованиями низменностей, плоскогорий и высоких горных хребтов. Рельеф земной поверхности непрерывно преобразуется. Силы, формирующие рельеф земной поверхности, по своей природе весьма разнообразны. С одной стороны, их источником служат внутренние причины, определяющие перемещение крупных блоков земной коры. Поднятия отдельных ее участков и грандиозные тектонические переустройства привели к образованию горных сооружений, т. е. положительных форм рельефа. С другой стороны, причинами переустройства рельефа являются внешние силы, определяющие расчленение и разрушение возвышенных участков земной поверхности, перенос разрушенного вещества и отложение его во впадинах. Этот противоположный процесс всеобщего выравнивания (нивелировки) земной поверхности, развивающийся в ряде случаев через усложнение рельефа, подчинен земному тяготению. Его направляющей силой является космическая энергия солнечного излучения.

Земная поверхность на границе атмосферы за год получает $7 \cdot 10^{24}$ Дж тепла в форме солнечного излучения или в среднем около 2,1 Дж на 1 см² в минуту. Из этого количества 42 % отражается обратно в мировое пространство, а 58 % поглощается земной поверхностью и атмосферой[1]. Это громадное количество энергии совершает колоссальную работу на поверхности земли, определяет тепловой режим океана и атмосферы, формирует климат и служит источником жизни на Земле. Около половины солнечной энергии, поглощаемой земной поверхностью, расходуется на испарение влаги. В результате последующей конденсации паров в атмосфере, на поверхность земли выпадают осадки, определяющие баланс влаги на земле.

[1] Вследствие встречного теплового (длинноволнового) излучения Земли ее тепловое состояние в среднем не меняется, так как получение тепла от Солнца и его расход взаимно уравновешены.

На поверхность суши ежегодно выпадает в виде атмосферных осадков больше влаги, нежели расходуется на испарение. Этот избыток, составляющий 36 тыс. км³, образует сток с суши. Сток атмосферных осадков ведет к денудации суши вследствие растворяющей деятельности воды и перемещения ею частиц горных пород в сторону понижения рельефа.

Реки земного шара переносят огромное количество твердого вещества в виде тончайшей взвеси и влекомых по дну наносов, объединяемых под названием «твердый сток». По приближенным подсчетам, ежегодный объем твердых осадков, сносимых реками в мировой океан, достигает порядка 20 млрд. т. Ежегодный приток солей в океан с суши оценивается в 2,7 млрд. т. Для площади внутриматерикового стока, составляющей 41,8 млн. км², или 27 % современной суши, масштаб этих процессов в среднем оценивается теми же цифрами.

Только в результате эрозионной деятельности рек поверхность суши в среднем понижается на 1 м за 10 000 лет или ежегодно теряет 260 т твердых веществ на каждый квадратный километр своей площади. Эта величина, носящая название **ежегодного слоя денудации**, для различных территорий оценивается следующими цифрами (в мм/год):

Азия	0,14
Европа	0,05
Русская равнина	0,03
Равнины США	0,04
Большой Кавказ	0,7
Альпы	0,86
Бассейн р. Волги	0,005
Бассейн р. Дуная	0,1
Бассейны рек Роны и По	0,27
Бассейн р. Амударьи	0,96
Бассейн р. Вахш	1,63
Остров Ява	до 2,0
Остров Калимантан (Борнео)	4,0

Различаясь для отдельных участков суши почти в 1000 раз, ежегодный слой денудации может быть много меньше, совпадать или значительно превышать среднюю величину понижения всей поверхности суши (0,1 мм в год). Наконец, отдельные пониженные области суши в результате того же твердого стока будут испытывать повышение уровня вследствие накопления осадков.

Деятельность рек не является единственной причиной нивелировки земной поверхности. Неравномерное нагревание атмосферы солнечной радиацией в различных широтах, а также над

сушей и над морем, приводит воздушные массы в непрерывное движение, т. е. к образованию ветров. Ветер подхватывает и переносит во взвешенном состоянии огромное количество пыли или перемещает более крупные минеральные частицы путем перекатывания. Деятельность ветра частично противоположна транспортирующей деятельности рек, перемещающих сносимый материал всегда только в пониженные области и, в самом общем случае, в мировой океан.

Образование литохимических потоков рассеяния месторождений полезных ископаемых протекает на поверхности суши за счет живой силы и растворяющей способности воды в результате закономерного перемещения продуктов выветривания силами гравитации в сторону понижения рельефа и в зону осадконакопления. Более подчиненное значение имеет деятельность современных ледников, однако в климатические эпохи прошлого в северных районах европейских стран, Канады и Аляски роль ледниковых процессов была чрезвычайно велика и следы ее сохранились до наших дней. В высокогорных районах заметную роль в формировании поля рассеяния играют осыпи, камнепады и каменные потоки, в приполярных районах специфическое значение приобретает солифлюкция. Транспортирующая сила ветра, за очень редкими исключениями, не способна образовать отчетливых литохимических потоков рассеяния.

Преобладание литохимических форм рассеяния рудных элементов и подчиненная роль гидрохимических процессов особенно отчетливо проявляются при формировании потоков рассеяния большинства рудных месторождений и в большинстве районов. Распределение химических элементов между растворимой и твердой фазой стока характеризуют их коэффициенты водной миграции и талассофильности (см. табл. 8). Кроме кислорода и водорода кларки океанической воды превышают кларки литосферы только по трем элементам — Cl, S и Br. Все остальные элементы не проявляют способности к накоплению в гидросфере и основные их количества сосредоточены в продуктах твердого стока. Рассматривая дефицит многих химических элементов в гидросфере, А. А. Сауков писал: «Если бы в земной коре не было факторов, регулирующих поступление химических элементов в моря и океаны, и если бы все элементы из горных пород при их выветривании беспрепятственно поступали в гидросферу, тогда состав последней был бы совсем другим, чем есть в действительности. В частности, в ней было бы в сотни и тысячи раз больше цинка, свинца, ртути, мышьяка, меди и селена» [38, стр. 115]. К перечню этих элементов можно добавить Sn, W, Ni, Mo, Cr, Au, Pt, Th и многие другие элементы, месторождения которых являются обычными объектами геохимических поисков. В аллювиальном потоке рассеяния, так же как по периферии элювио-делювиального ореола рудного месторождения, преобладание литохимических форм рассеяния определяется следующими факторами:

1) направленностью обменных химических реакций в водной среде в сторону образования наиболее труднорастворимых и слабодиссоциирующих соединений;

2) выпадением из раствора гидроксидов большинства тяжелых металлов уже при значениях pH$<$5,5, в то время как воды ручьев и рек горных районов имеют обычные значения pH$\geqslant$7;

3) сорбцией катионов металлов минеральными и органическими коллоидами тонкодисперсных илисто-глинистых фракций аллювия.

Старейшим методом исследования механических потоков рассеяния в поисковых целях является шлиховая съемка. Однако применимость ее ограничена поисками месторождений, минералы которых по своей высокой плотности ($>$4 г/см³), а также химической и механической устойчивости способны к концентрации в шлихах. Это заставило, вслед за созданием методов литохимических поисков ореолов рассеяния рудных месторождений, обратиться к разработке методики поисков потоков рассеяния тех месторождений цветных и редких металлов, минералы которых не принадлежат к типично шлиховым (Cu, Ni, Co, Ag, Pb, As, Zn, Mo, U и др.). Целесообразность исследования с этой целью именно продуктов твердого стока выявилась очень быстро. По данным Н. М. Страхова [44] о формах переноса в реках основных компонентов осадков (рис. 13), миграция рудных элементов в истинных растворах играет весьма подчиненную роль. Общее соотношение между суммой влекомых и взвешенных наносов рек и стокам растворенных веществ для горных стран оценивается им цифрами 7,66 : 1,0. Преобладает растворимый сток только в равнинных реках (Нева, Волга, нижнее течение Лены и др.), в районах которых поиски рудных месторождений по их потокам рассеяния не проводятся. В целом механическая и химическая денудация максимальны в районах гумидного климата со средней годовой температурой выше +10 °С и прямым образом зависит от степени расчлененности рельефа и тектонической активности района. При этом у горных рек в ряде случаев механический транспорт Fe, Mn, P и малых элементов (V, Cr, Ni, Co, Cu и др.) «вообще становится единственно значимой формой» переноса [44, т. I, стр. 32]. Все сказанное не ставит под сомнение возможность образования

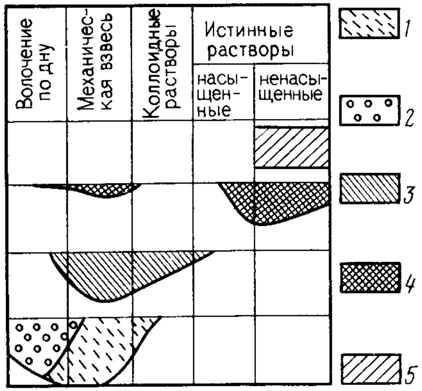


Рис. 13. Формы переноса в реках основных компонентов осадков [44].
1 — минералы глин; *2* — минералы алевролитов и песков; *3* — железо, марганец, фосфор, большая часть микроэлементов (V, Cr, Ni, Co, Cu...); *4* — карбонаты Ca, Mg; *5* — хлориды и сульфаты K, Na, Ca, Mg

аномальных концентраций рудных элементов в речных водах в соответствие с взаимосвязанностью и взаимообусловленностью возникновения геохимических аномалий в различных геосферах (см. 1.7), в данном случае только указывается на преобладание твердой фазы в потоках рассеяния рудных месторождений. Существенная роль переноса реками в растворенном состоянии отмечалась для As и Mo в Забайкалье, она несомненно значительна и для B, F, Sr и Li; в форме сульфат-иона мигрирует в речных водах сера сульфидных месторождений. Обобщая вопрос о методике геохимических поисков рудных месторождений по их потокам рассеяния в гидросети, можно утверждать, что опробованию в поисковых целях подлежат «стенки сосуда», заключающего тот или иной водоисточник, т. е. твердый материал горных пород, слагающий берега или дно ручьев, рек и родников. Этот вывод не исключает существования таких геохимических условий, в которых поиски определенных полезных ископаемых наиболее целесообразно вести гидрохимическим методом (см. 5.1).

2.2. УРАВНЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ПОТОКА РАССЕЯНИЯ

Произведем расчет содержаний металла в литохимическом потоке рассеяния для произвольного месторождения, вторичный остаточный ореол рассеяния которого подвергается современной денудации на горном склоне какой-либо долины. Будем именовать потоком I порядка любую реку (ручей, долину), не имеющую боковых притоков. Согласно этой классификации, две реки I порядка, сливаясь образуют реку II порядка; две реки II порядка, сливаясь образуют реку III порядка, которая в свою очередь может принимать в качестве боковых притоков другие реки только I и II порядков и т. д.

Бассейны водосборов русел I порядка чаще всего имеют грушевидную форму и площадь их S_x для любой точки русла возрастает пропорционально квадрату расстояния x от вершины водораздела 0 (рис. 14). Пусть на склоне этой долины расположен вторичный остаточный ореол рассеяния с площадной продуктивностью P м² % металла. Задача заключается в установлении зависимости содержаний металла C_x'* в русловых отложениях от координаты точки опробования:

$$C_x' = f(x) = f(P,\ S_x), \qquad (30)$$

где P имеет смысл местного параметра; $S_x = \varphi(x)$. В соответствии с приведенными выше данными допустимо считать, что формирование потока рассеяния целиком определяется твердым стоком. В русле ручья, изображенном на рис. 14, следует различать три интервала: первый, расположенный выше точки R_0, в которой рудный материал из ореола рассеяния не поступает;

* Буквенные обозначения величин, относящихся к потокам рассеяния, принято дополнять значком «штрих» (см. приложение).

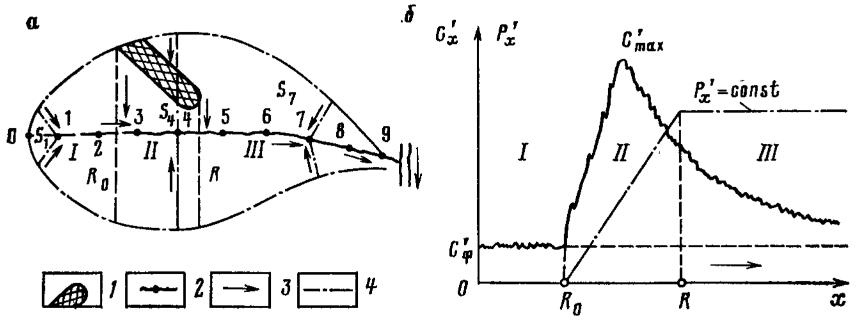


Рис. 14. К расчету литохимического потока рассеяния.

а — положение рудного тела в бассейне водосбора; *б* — графики потоков рассеяния; *1* — вторичный остаточный ореол рассеяния с продуктивностью P, м² %; *2* — точки опробования аллювиальных отложений; *3* — направление стока; *4* — границы водосборов S_x. Римскими цифрами обозначены интервалы, ограниченные точками начала (R_0) и окончания (R) поступления металла в русло из ореола

второй, между точками R_0 и R, на протяжении которого сносимый в русло с левого склона «ореольный» элювио-делювий определяет появление аномальных содержаний металла в аллювии и третий, ниже точки R, на котором этот аллювий пополняется только материалом, сносимым с обоих безрудных склонов, в результате чего аномальные содержания металла постепенно падают.

Во всех точках опробования в I интервале русла содержания металла, очевидно, остаются фоновыми, и зависимость (30) приобретает вид тождества

$$C_x' = C_\text{ф}'. \qquad (31)$$

Аллювиальные отложения в первом приближении представляют собой природную среднюю пробу, характеризующую все разнообразие горных пород и наличие рудных тел в бассейне денудации данного водотока.

В III интервале русла содержания металла в аллювии будут превышать фоновые на величину

$$\Delta C_x' = \frac{q_\text{ме}}{q_\text{гп}} \cdot 100\%,$$

где $q_\text{ме}$ — дополнительное количество металла, поступающего в русло за счет денудации ореола рассеяния; $q_\text{гп}$ — общее количество материала горных пород, сносимых за тот же отрезок времени со всей площади водосбора S_x, отвечающей точке опробования на расстоянии x от вершины водораздела.

Обозначая средний слой денудации Δh, имеем:

$$q_\text{ме} = P\Delta h d \cdot 10^{-2};$$

$$q_\text{гп} = S_x \Delta h d,$$

где d — объемная масса сносимого в русло элювио-делювия.

Отсюда $\Delta C_x = P/S_x$;

$$C'_x = \frac{P}{S_x} + C'_\text{ф}. \tag{32}$$

Во II интервале в русло будут поступать различные количества металла, зависящие от продуктивности P_x той части ореола рассеяния, которая участвует в формировании твердого стока точки опробования x. Считая для простоты, что линейная продуктивность ореола на всем интервале $R—R_0$ остается постоянной, имеем $P_x/P = (x—R_0)/(R—R_0)$. Отсюда согласно (32)

$$C'_x = \frac{P_x}{S_x} + C'_\text{ф} = \frac{P\,(x-R_0)}{S_x\,(R-R_0)} + C'_\text{ф}. \tag{33}$$

Тождество (31) и уравнения (32) и (33) характеризуют распределение содержаний металла в идеальном литохимическом потоке рассеяния. Каждое из этих уравнений отвечает определенному интервалу русла и аналитически они несовместимы.

Решая уравнение (32) относительно P, имеем:

$$P = S_x\left(C'_x — C'_\text{ф}\right). \tag{34}$$

Равенство (34), характеризуя идеальный поток рассеяния, в природных условиях заменяется пропорциональной зависимостью. Обозначая правую часть выражения (34) символом P' и именуя ее, по аналогии с такими же параметрами ореолов и рудных тел, *продуктивностью потока рассеяния*, можно с полным основанием написать:

$$P' = S_x\left(C'_x — C'_\text{ф}\right) = k'P = \text{const}, \tag{35}$$

где $k \gtrless 1{,}0$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от местных орогидрографических условий и индивидуальных свойств химических элементов, в частности, от реальных соотношений между их твердым и растворимым стоком.

Если относительная величина общего стока элементов породообразующих минералов превышает относительный сток рудного элемента по сравнению с их соотношениями в элювио-делювии, аллювий обогащается рудным элементом и объем его стока пропорционально возрастает. Уровень содержаний металла в аллювии C_x', на котором достигается динамическое равновесие между его приходом и расходом, определяет величину $k' > 1{,}0$. Если вследствие малой плотности, способности к переизмельчению или высокой растворимости рудных минералов, общий сток рудного элемента опережает сток петрогенных элементов, местный коэффициент пропорциональности приобретает значение $k' < 1{,}0$.

Поскольку при установлении зависимостей (32) — (35) мы не связывали себя какими-либо предположениями о форме

водосборного бассейна, действие их, в принципе, можно распространить на русла II и более высоких порядков. Соответственно этому в любом идеальном литохимическом потоке рассеяния можно выделять: интервал фоновых содержаний рудного элемента $x \leqslant R_0$, в котором для всех точек продуктивность потока рассеяния P_x' тождественно равна нулю; интервал аномальных содержаний металла $R_0 < x \leqslant R$, обязанных его поступлению со склона в русло, в котором продуктивность потока непрерывно возрастает; интервал $x > R$, в котором аномальные содержания металла падают, асимптотически приближаясь к фону, а продуктивность потока рассеяния остается постоянной. Эти зависимости характеризуют графики на рис. 14 и данные табл. 10.

По графикам $C_x' = f\,(x)$ по признаку $C_x' \geqslant C_\text{A}'$ определяется только положение точки R_0 — начало поступления рудного элемента из ореола рассеяния в русло. Определить положение точки R, указать число рудных тел или оценить сравнительный масштаб оруденения в бассейне водосбора по графикам содержаний металла нельзя даже при опробовании русел I порядка. Эти важные дополнительные сведения для участков с аномальными содержаниями металла в русле обеспечивает анализ графиков продуктивности потоков рассеяния $P_x' = f\,(x)$.

Согласно выражению (35), продуктивность потока рассеяния в III интервале русла теоретически остается постоянной (см. рис. 14), с общей тенденцией к убыванию в реальных потоках рассеяния. Поэтому на графике продуктивности потока рассеяния по признаку прекращения роста P_x' можно определить положение точки R, а по величине $P'_x = \text{const}$ с учетом

Таблица 10

Характеристики идеального потока рассеяния

Интервал значений x	Содержание металла в потоке рассеяния C'_x	Продуктивность потока рассеяния $P'_x = S_x\left(C'_x - C'_\text{ф}\right)$
I $0 < x \leqslant R_0$	$C'_x = C'_\text{ф}$ (фоновое)	$P'_x = 0$
II $R_0 \leqslant x \leqslant R$	$C'_x = \dfrac{P\,(x - R_0)}{S_x\,(R - R_0)} + C'_\text{ф}$ (аномальное — возрастает и убывает)	P'_x — возрастает
III $x \geqslant R$	$C'_x = P/S_x + C'_\text{ф}$ (аномальное — убывает, асимптотически приближаясь к фону)	P'_x $k'P = \text{const}$

местного значения k' — оценить площадную продуктивность вторичных ореолов рассеяния, развитых в пределах данного водосборного бассейна. Последнее имеет прямое значение для оценки масштаба ожидаемого коренного оруденения, согласно зависимости

$$P_р = \frac{1}{k'k} P'. \tag{36}$$

Рассмотрим более детально ожидаемый вид графиков $C'_x = f(x)$ в зависимости от положения вторичного ореола рассеяния в бассейнах водосбора различной формы. Для решения этой задачи удобно линию русла в плане совместить с осью абсцисс, считая ее одновременно осью симметрии долины, а для линии водораздела, оконтуривающей бассейн стока, подобрать алгебраический многочлен $y = \varphi(x)$, аппроксимирующий форму реального водосбора. В этом случае необходимая для расчета потока рассеяния площадь стока S_x, для любой точки русла выразится через интеграл простейшего вида

$$S_x = 2\int_0^{x_i} \varphi(x) \cdot dx,$$

Так, например, бассейны русел I порядка, подобные изображенному на рис. 14, удовлетворительно оконтуривает кривая $y = x - \frac{1}{2b}x^2$ и, следовательно, площади водосборов для соответствующих точек опробования могут вычисляться из выражения

$$S_x = x^2 - \frac{1}{3b}x^3, \tag{37}$$

где $2b$ — длина русла (заметим, что b имеет размерность длины и потому правая часть последнего выражения сохраняет размерность площади).

Поток рассеяния рудного тела, расположенного в бассейне такого водосбора, при $b = 1{,}0$, для интервала русла $R_0 \leqslant x \leqslant R$ будет согласно (33) определяться уравнением

$$C'_x = \frac{3P(x - R_0)}{(3x^2 - x^3)(R - R_0)} + C'_ф. \tag{38}$$

При постоянных значениях P графики содержаний металла C'_x в потоке рассеяния, в зависимости от положения точек R_0 и R, будут иметь существенно различный вид. Сделанное допущение (37) о форме бассейна, схематизирующее эрозионное расчленение земной поверхности, не повлияет на характер дальнейших выводов. С таким же успехом форму бассейнов водосбора можно уподобить треугольнику, квадрату или эллипсу, площади которых возрастают пропорционально квадрату одного из линейных размеров. Весьма выразительный вид

имеет семейство кривых, рассчитанных для различных положений точки начала поступления металла в русло $R_0 = 0{,}0$; 0,1; 0,2...0,9 при постоянных значениях $R = 1{,}0$ и $P = 100$ (рис. 15). Особенностью их является наличие резко выраженного максимума содержаний металла в верхнем течении водотока. Положение точек с максимальным содержанием металла и величину этого содержания C'_{max} в потоке рассеяния найдем, дифференцируя выражение (38) и приравнивая производную нулю. В итоге легко убедиться, что действительный максимум графики содержаний металла в потоке рассеяния имеют только для значения $R_0 < 0{,}35R$, так как уже при значениях $R_0 = 0{,}35R$ экстремальная точка имеет координату $x > R$ и, следовательно, лежит в мнимой области. Сходное семейство кривых с максимальными значениями C_x' в области $x < 0{,}35$ образуют графики содержаний металла $C_x' = f(x)$ при постоянной протяженности ореола рассеяния $R - R_0 = 1{,}0$ и совместном последовательном перемещении точек R_0, R от вершины водосбора в сторону устья долины. Действительного максимума графики содержаний металла C_x' в нижнем течении русла не имеют. Для всех точек, удаленных от вершины водораздела на расстояние $x > R$ и, следовательно, лежащих ниже непосредственного привноса рудного материала, содержание металла в потоке рассеяния будет прогрессивно убывать, подчиняясь уравнению (32). С геометрической стороны эта зависимость представляет собой гиперболу с аргументом S_x. Соответствующий ей отрезок для случая, когда S_x подчиняется зависимости (37), изображен на рис. 15. Эта гипербола является о б щ и м п р о д о л ж е н и е м для всех кривых семейств (38), с которыми они имеют общую точку $x = R$.

Недостаточность анализа графиков содержаний рудного элемента и важность анализа продуктивности потоков рассеяния можно иллюстрировать следующим примером. На рис. 16 схематически изображены два случая различных положений вторичных ореолов рассеяния в бассейне водосбора. Площадная продуктивность первого ореола принята в 2 раза меньше второго. Для каждого из этих случаев при $k' = 1{,}0$ произведен расчет содержаний металла C'_x в пробах и продуктивностей P'_x потоков рассеяния. Из приведенных графиков следует, что при рассмотрении только содержаний металла первоочередное внимание ошибочно привлек бы первый случай, характеризуемый более высоким уровнем и большей протяженностью аномальных содержаний металла в русле. Только анализ графиков продуктивности потоков рассеяния позволил бы правильно оценить бóльшую перспективность оруденения, отвечающего второму случаю. Любопытно, что при оценке результатов шлиховой съемки доныне господствует принцип: «весовые количества (рудного минерала в шлихе) — это хорошо, единичные знаки — плохо». Недостаточность этого критерия, имеющего многовековую давность, вполне очевидна.

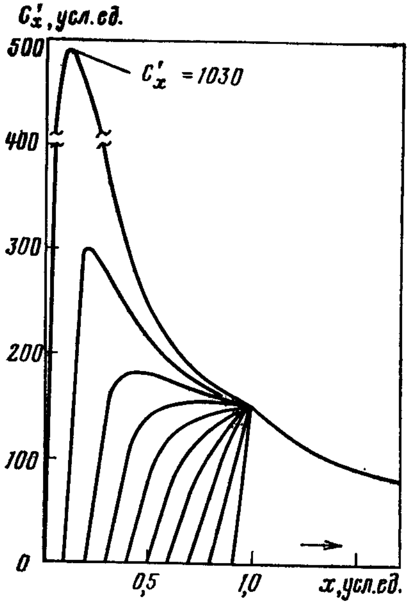


Рис. 15. Семейство кривых $C'_x = f(x)$ для различных положений точки $R_0 = 0{,}0;\ 0{,}1;\ 0{,}2;\ \dots\ 0{,}9$ при $C'_ф = 0$; $P = 100$; $R = 1{,}0$ и $S_x = x^2 - \frac{1}{3}x^3$.

Стрелкой на рисунке показано направление стока

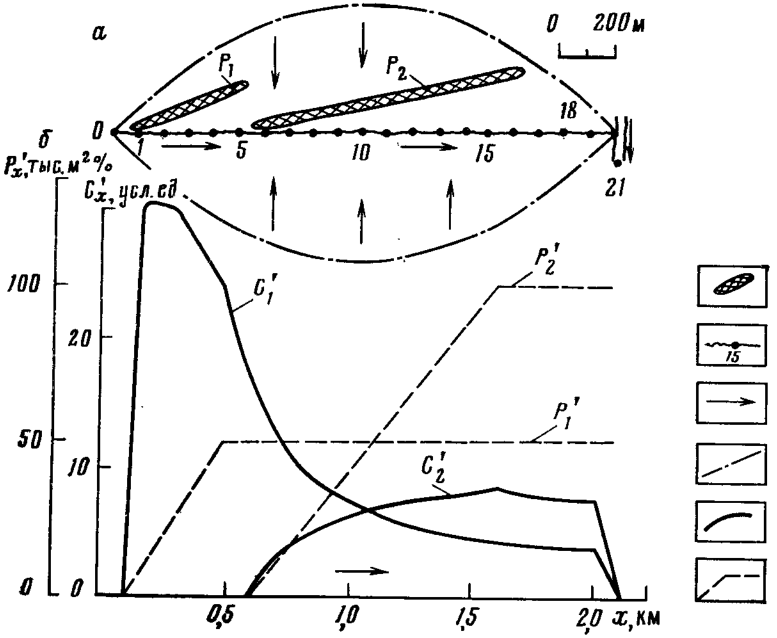


Рис. 16. Два случая положения рудных тел в бассейне водосбора (*а*) и графики потоков рассеяния (*б*).

1 — вторичные ореолы рассеяния с продуктивностью $P_2 = 2P_1$; *2* — точки опробования; *3* — направление стока; *4* — граница бассейна. Графики: *5* — содержания металла (за вычетом фона); *6* — продуктивности потока рассеяния

Потоки рассеяния, связанные с обширным по площади рудным участком, могут развиваться в нескольких смежных руслах. Общую продуктивность такой группы потоков рассеяния определит сумма продуктивностей независимых потоков с учетом последовательного слияния русел со значениями $P_x' = \text{const}$. Показатель $P'_{общ} = \sum_{i=1}^{m} P'_i$ характеризует уже не отдельное русло, а конкретный геологический объект — рудное месторождение, образовавшее потоки рассеяния в m смежных руслах. Оценкой нового объекта при поисковых работах служат цифры прогнозных ресурсов металла $Q'_н$, подсчитанные на целесообразную глубину. Такие подсчеты допустимы только после геологического осмотра участка на местности, в результате которого устанавливаются генетический тип и условия залегания выявленного оруденения (см. гл. 6). В основу оценки прогнозных ресурсов металла по геохимическим данным положена пропорциональная зависимость (36) между продуктивностью коренного оруденения $P_р$ и продуктивностью литохимических ореолов и потоков рассеяния (P; $\Sigma P_i'$ м² %). Для относительно крутопадающих (не горизонтальных) рудных залежей (см. рис. 9) это позволяет оценку $P_р$ распространить до обоснованно выбранной глубины H согласно зависимости

$$Q'_H = \frac{1}{k'k} \cdot \frac{1}{40} H \sum_{i=1}^{m} P'_i, \tag{39}$$

где k' и $k \gtrless 1{,}0$ — местные коэффициенты пропорциональности, определяемые из опыта работ. Деление на 40 отвечает переходу от квадратных метропроцентов к тоннам металла.

2.3. ФОРМИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ

Зависимости (32)—(33) и вытекающее из них условие $P'_x = S_x(C'_x - C'_ф) = \text{const}$ при $x > R$ имеют фундаментальное значение в теории формирования литохимических потоков рассеяния рудных месторождений. Основаны они на допущении, что в любой точке русла аллювий по своему химическому составу является природной средней пробой, характеризующей состав пород (и руд), слагающих ее бассейн денудации. В горных районах это условие не противоречит общему ходу процессов: миграция петрогенных и рудных элементов в основном протекает в форме твердого стока. В руслах горных рек происходит турбулентное перемешивание элювио-делювиальных продуктов выветривания, поступающих со склонов, а формирующийся при этом аллювий в целом выносится за пределы горной страны.

В долинах горных рек всегда имеется валунно-глыбовый, песчано-галечный и глинисто-илистый материал, из которого при литохимических съемках отбирается проба мелкозема. Отложение аллювиального материала, естественно, не ведет к постепенному заполнению русел горных рек. В течение длительных геологических периодов эрозионное развитие горных

стран протекает в режиме динамического равновесия между поступлением материала со склона в русло и его выносом или, при наличии неотектонических явлений, стремится к регулярному режиму.

При формировании литохимических потоков рассеяния русло реки является не только областью перемешивания и транспорта рыхлого материала, но и временным базисом денудации, т. е. областью его отложения. При этом в местном аллювии преувеличенную роль по сравнению с идеализированной картиной играет материал ближайших склонов. Вследствие этого в интервале привноса в русло рудного материала со склонов вычисленная по формуле (34) величина P'_x превышает истинное значение продуктивности потока рассеяния, а ниже по течению, взамен приобретения постоянных значений, P'_x быстро падает. В результате отсчет устойчивых значений продуктивностей потоков рассеяния и оценка прогнозных ресурсов металла по формуле (39) становятся невозможными. В этих условиях значения P'_x, вычисленные по формуле (34), следует именовать кажущейся продуктивностью потока рассеяния, истинное значение которой $P'_{\text{ист}}$ остается неизвестным. Для преодоления этих затруднений А. Н. Боголюбовым [25] и В. В. Поликарпочкиным [25, 30] предлагались соответствующие решения. Производственного применения эти методы не получили. Ниже рассматривается решение, отвечающее запросам практики [43].

Степень отличия опробуемых отложений от состава природной средней пробы всего бассейна денудации зависит от множества причин. Попытки раздельной оценки влияния каждой из них на формирование литохимических потоков рассеяния были бы заведомо безнадежны. Единственно реальным в этих условиях является характеристика сложной зависимости с помощью особого коэффициента, отражающего всю сумму действующих факторов. В данном случае введем безразмерный коэффициент $\alpha' \geqslant 1{,}0$, характеризующий кратность участия в аллювии материала ближайших склонов по сравнению с его ожидаемой долей в составе природной пробы. В дальнейшем будем именовать α' «склоновым коэффициентом аллювия».

Обозначим через C'_x и C'_{x-1} содержания рудного элемента в смежных точках опробования, из которых вторая лежит выше по течению реки и соответственно имеет площадь водосбора $S_{x-1} < S_x$. В аллювиальных отложениях данного русла роль местного склонового материала в α' раз больше, нежели это следовало бы из представлений о природной средней пробе. Поэтому содержание рудного элемента в точке x будет отвечать средневзвешенному значению, пропорционально поступлению металла по руслу $C'_{x-1} \cdot S_{x-1}$ и с прилегающего отрезка склона $S_x - S_{x-1} = \Delta S_x$. Принимая, что на этом отрезке

склона имеются вторичные ореолы рассеяния с продуктивностью ΔP_x и учитывая фоновые количества металла, имеем

$$C'_x = \frac{C'_{x-1} \cdot S_{x-1} + \alpha' \Delta P_x + \alpha' C'_\phi \Delta S}{S_{x-1} + \alpha \Delta S}. \quad (40)$$

Легко видеть, что при значениях $C'_{x-1} = C'_\phi$, $\alpha' = 1{,}0$ и $\Delta P_x = P$ это выражение приводится к виду (32). Из выражения (40) также следует, что при $S_{x-1} = 0$ величина C_x' перестает зависеть от α', и при любых его значениях соблюдается простейшая зависимость (35). Этот вывод полностью соответствует наблюдениям, согласно которым при малых начальных водосборах S_{R_0}, характерных для русел I—II порядков, графики продуктивностей реальных потоков рассеяния достаточно близки к изображенному на рис. 16. Принимая $C_\phi' = 0$, что по смыслу отвечает значению C_x' за вычетом фоновых содержаний, освобождаясь от знаменателя и вводя обозначение $C'_x - C'_{x-1} = \Delta C'_x$, имеем

$$S_{x-1} \cdot \Delta C'_x + \alpha' C'_x \Delta S - \alpha' \Delta P = 0.$$

После деления на ΔS и перехода к пределу $\Delta S \to 0$, при котором $S_{x-1} \to S_x$, получим дифференциальное уравнение процесса, которому подчиняется формирование реального потока рассеяния

$$S_x \frac{dC'_x}{dS_x} + \alpha' \left(C'_x - \frac{dP_x}{dS_x} \right) = 0. \quad (41)$$

Эта формула описывает связь между продуктивностью вторичного ореола рассеяния на склоне и содержанием рудного элемента в аллювии на всем протяжении русла, пока склоновый коэффициент α' остается постоянным, независимо от наличия или отсутствия аномалии на склоне. На всем интервале русла от точки R_0 до точки R поступление металла со склона согласно принятой модели происходит равномерно, или $\frac{dP}{dS} = \frac{P}{S_R - S_{R_0}}$. Подставляя это выражение в (41) и разделяя переменные, имеем

$$\frac{dC'_x}{C'_x - \dfrac{P}{S_R - S_{R_0}}} = -\alpha' \frac{dS_x}{S_x}.$$

Интегрируя это уравнение и освобождаясь от логарифмов, имеем:

$$C'_x - \frac{P}{S_R - S_{R_0}} = AS_x^{-\alpha'}, \quad (42)$$

где A — результат потенцирования постоянной интегрирования.

Значение А найдем для точки $S_x = S_{R0}$, в которой $C_x' = 0$. Подставляя значение А в выражение (42) и решая его относительно C_x', с учетом $C_ф = 0$ имеем:

$$C_x' = \frac{R}{S_R - S_{R_0}}\left[1 - \left(\frac{S_{R_0}}{S_x}\right)^{\alpha'}\right] + C_ф'. \qquad (43)$$

На всем протяжении русла ниже точки $x = R$, в III интервале потока рассеяния $\frac{dP}{dS} = 0$, откуда $\frac{dC_x'}{C_x'} = -\alpha' \frac{dS_x}{S_x}$. Интегрируя это выражение, имеем

$$\ln C_x' = -\alpha' \ln S_x + B, \qquad (44)$$

где B — постоянная интегрирования.

Значение ее определим до точки $x = R$:

$$B = \ln C_R' + \alpha' \ln S_R.$$

Подставляя значение B в выражение (44), освобождаясь от логарифмов и решая его относительно C_x' с учетом $C_ф' \neq 0$, имеем

$$C_x' = \frac{(C_R' - C_ф')}{(S_x/S_R)^{\alpha'}} + C_ф'. \qquad (45)$$

Зависимости (43) и (45) являются уравнениями реального литохимического потока рассеяния, соответственно для его II и III интервалов. На рис. 17 изображены графики содержаний рудного элемента $C_x' = f(S_x)$ и продуктивностей $P_x' = f(S_x)$ потоков рассеяния для различных значений $\alpha' \geqslant 1{,}0$ при $S_{R0} : S_R = 0{,}5$, вычисленные по этим формулам. В данном случае максимальные значения кажущейся продуктивности в два раза превышают ее истинное значение.

Семейство кривых $P'/P'_{ист}$, показанное на рис. 18, устанавливает зависимость кажущейся продуктивности от положения точки R_0. Так при $S_{R0} = 0$ продуктивность потока рассеяния в точке R равна истинной, хотя при $\alpha' > 1{,}0$ условие $P_x' = \text{const}$ не соблюдается и ниже R обнаруживается характерное падение продуктивности. При значениях $S_{R0}/S_R = 0{,}8$ для заданного значения $\alpha' = 10{,}0$ кажущаяся продуктивность почти в пять раз превышает истинную и с приближением S_{R0}/S_R к 1,0 это превышение прогрессивно увеличивается. Количественная интерпретация таких потоков рассеяния требует определения их истинной продуктивности, для ее учета в составе $\Sigma P_i'$, определяющей общую продуктивность выявленного объекта.

Решая уравнение (45) относительно α', имеем

$$\alpha' = \frac{\lg\left(\dfrac{C_R' - C_ф'}{C_x' - C_ф'}\right)}{\lg(S_x/S_R)}. \qquad (46)$$

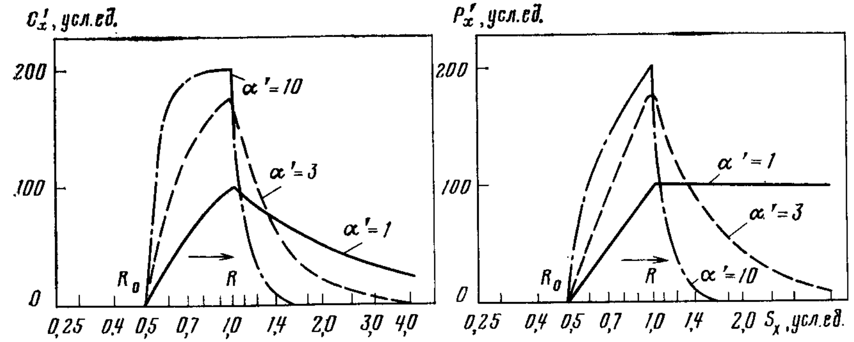


Рис. 17. Графики $C_x' = f(S_x)$ и $P_x' = f(S_x)$ истинной (при $\alpha' = 1$) и кажущейся (при $\alpha' = 3$ и $\alpha' = 10$) продуктивностей потоков рассеяния.

Стрелками показано направление стока

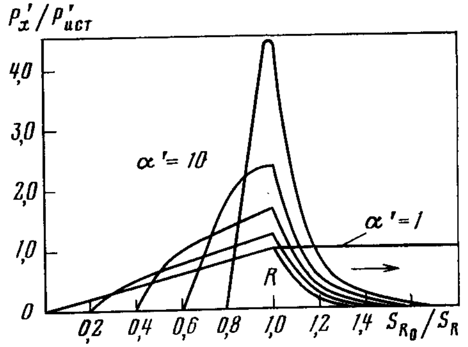


Рис. 18. Графики кажущейся продуктивности $P_x'/P_{ист}'$ при $\alpha' = 10$ и $\alpha' = 1$ при различных значениях S_{R0}/S_R

В первом приближении можно принять, что положение точки R определяется переходом графика кажущейся продуктивности потока рассеяния $P_x' = f(S_x)$ через максимум, которому отвечают значения C_R' и S_R. Подставляя в выражение (46) значения C_x' и S_x для точки, лежащей ниже (по течению) точки R, найдем местную величину α'. Повторяя эти вычисления для точек $R+2$, $R+3\ldots$, можно найти 3—4 значения α', из которых затем вычисляется среднее геометрическое $\tilde{\alpha}'$. Зная $\tilde{\alpha}'$, можно найти истинное значение продуктивности потока рассеяния. Решая уравнение (43) относительно P, имеем

$$P = P_{ист}' = \frac{C_x'(S_R - S_{R_0})}{1 - \left(\dfrac{S_{R_0}}{S_x}\right)^{\alpha'}}.$$

Умножая и деля числитель этого выражения на S_R и учитывая, что $C_R' S_R = P_R' = P'_{max}$, имеем окончательно:

$$P_{ист}' = P_{max}'\left[\frac{1 - (S_{R_0}/S_R)}{1 - (S_{R_0}/S_R)^{\alpha'}}\right] = \lambda' P_{max}'. \qquad (47)$$

Таким образом, истинную величину продуктивности литохимического потока рассеяния, не подчиняющегося условию $P_x'=\text{const}$, можно найти по максимальной величине кажущейся продуктивности $P'_{\max}$ с помощью поправочного множителя λ' зависящего от местного значения α' и соотношения между размерами площадей водосборов в точках начала S_{R_0} и конца S_R поступления металла со склона в русло. Для определения величины этого поправочного множителя $\lambda'<1{,}0$ по найденному значению α' и конкретному соотношению между S_{R_0} и S_R составлена номограмма [43], построенная на основе формулы (47). Рассмотрение этой номограммы (рис. 19) показывает, что при $S_{R_0}=0$ или $\alpha'=1$ имеем $\lambda'=1{,}0$ и соблюдается условие $P_x=\text{const}$.

Количественная интерпретация литохимических потоков рассеяния изложенным способом рассчитана на «ручной счет» с применением микрокалькуляторов типа «Электроника БЗ-18» или по соответствующим программам для «БЗ-21» или «МК-46» [10]. Для интерпретации потоков рассеяния на ЭВМ Ю. В. Шваровым была составлена программа «Поток», основанная на отыскании средневзвешенной суммы кажущейся продуктивности P_x' и «статической» составляющей продуктивности P_x'', отражающей отложения в русле материала сносимого со склона, согласно зависимости

$$P'_{\text{ист}}=\beta' P'_x+(1-\beta')\,P''_x,$$

где β' — множитель, названный «коэффициентом выноса», по смыслу отвечает условию $\beta'=1/\alpha'$.

При $\beta'=1{,}0$ имеем случай идеального потока рассеяния.

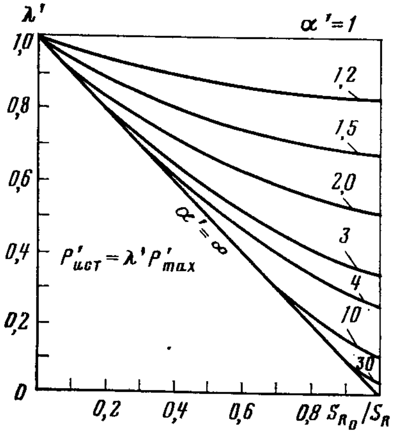


Рис. 19. Номограмма для оценки λ' по значениям α' и S_{R_0}/S_R [43]

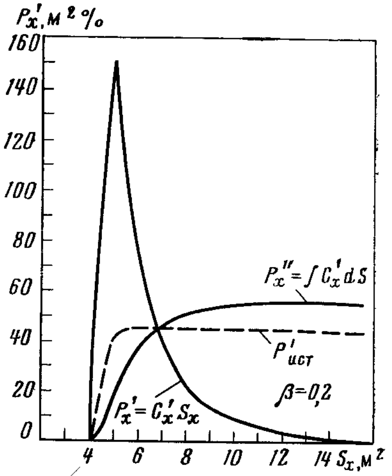


Рис. 20. К интерпретации потоков рассеяния на ЭВМ. *По Ю. В. Шварову.*

При $\beta'=0$ поток рассеяния в русле повторяет средние содержания металла $\bar{C}_x$ — на склонах по линиям градиента рельефа долины, соединяющим точки опробования с водоразделами. Статическая составляющая определяется величиной интеграла

$$P''_x=\int\limits_0^S (C'_x-C'_\Phi)\,dS,$$

монотонно возрастающей к устью водотока. Поскольку кажущаяся продуктивность ниже точки P монотонно убывает, отыскание β' и $P'_{\text{ист}}$ возможно исходя из условия $P'_{\text{ист}}=\text{const}$. Для уточнения этих оценок путем использования данных по всем точкам опробования с аномальными содержаниями металла программа «Поток» проводит аппроксимацию средних содержаний на склонах нормальным распределением, взамен прямоугольного, принятого нами ранее. Отыскание параметров этого распределения — $\bar{C}_{\max}$, σ и координаты его центра S' — производится совместно с определением β' и $P'_{\text{ист}}$ методом наименьших квадратов, с выдачей этих данных на печать. На рис. 20 показан пример, поясняющий сказанное. Оба метода интерпретации, и «ручной», и машинный, дают практически одинаковые результаты и основаны на предположениях, что на всем интервале русла от $x=R_0$ до $x=R$ вторичные ореолы рассеяния на склонах образуют одну общую аномалию, из которой происходит поступление рудного элемента в русло, и за пределами этого интервала дополнительных аномалий не имеется. Это не исключает наличия других рудных объектов в бассейне водосбора данного русла при условии, что ниже точки R содержание рудного элемента в аллювии падает до фонового и новая аномалия допускает ее независимое рассмотрение. В практике поисков это условие часто нарушается и в пределах одного русла наблюдаются сближенные аномалии, в различной степени накладывающиеся друг на друга. Примеры такого рода показаны на рис. 21. Если на всем протяжении русла $\alpha'=1{,}0$ и потоки рассеяния подчиняются условию $P_i'=\text{const}$, оценка суммарной продуктивности всех аномалий определяется нижней по течению (максимальной) величиной ее устойчивых значений. При этом продуктивность каждой отдельной аномалии определяется как разность между двумя смежными устойчивыми значениями: $(P_i')_{\text{ист}}=(P_i')_{\text{набл}}-(P'_{i-1})_{\text{набл}}$. При значениях $\alpha'>1{,}0$ графики потоков рассеяния, образованные сближенными объектами, существенно осложняются. Интерпретация двух или нескольких сближенных аномалий, между которыми содержание рудного элемента при $\alpha'>1{,}0$ остаются аномальными, возможна методами «ручного счета». Для этого продуктивность потока, обусловленную влиянием первой аномалии (считая от вершины водораздела), следует вычесть из $P'_{\max 2}$ или

$$P'_{\text{ист}\,2}=\lambda'_2\left[P'_{R2}-P'_{R1}\left(S_{R1}/S_{R2}\right)^{\alpha'_1-1}\right]. \tag{48}$$

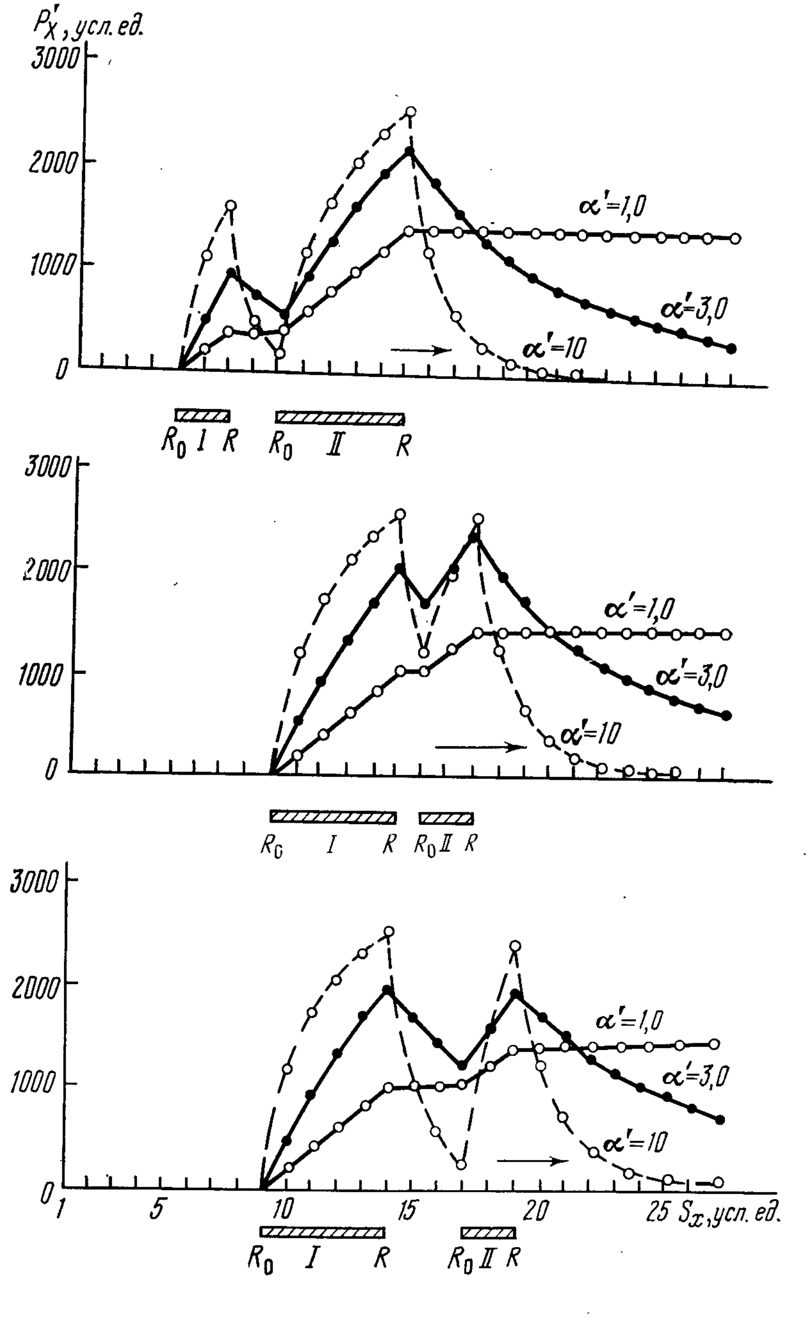


Рис. 21. Расчетные графики кажущейся продуктивности потоков рассеяния при различных расстояниях между рудными объектами I и II при $\alpha'=1{,}0$; 3,0 и 10. *По А. П. Полквому.*

Стрелками показано направление стока

Здесь индексы 1, 2 означают принадлежность данной величины соответственно к первой или второй аномалии. Аналогичным путем могут интерпретироваться три или большее число сближенных аномалий в пределах одного русла. Сумма всех истинных, в том числе устойчивых, продуктивностей потоков рассеяния по данному и по смежным руслам определяет общую продуктивность рудного объекта $\sum_{i=1}^{m} P'_i$, входящую в формулу (39), по которой подсчитываются прогнозные ресурсы металла.

2.4. МЕТОДИКА ПОИСКОВЫХ СЪЕМОК

Поиски рудных месторождений по их литохимическим потокам рассеяния ведутся в горных районах на первой стадии съемочно-поисковых работ путем систематического опробования аллювиальных отложений гидросети. Пробы берутся из аллювиальных отложений в пределах сухой пойменной части русла с глубины 10—15 см, реже из воды. В пробу отбирается песчано-глинистая фракция аллювия, при ее отсутствии илисто-глинистая, а при отсутствии этой фракции гравийно-дресвяная, т. е. отбирается тот материал («мелкозем»), в форме которого в местных условиях протекает твердый сток. Частой смены характера пробы в пределах одного русла следует избегать, так как это снижает воспроизводимость аналитических данных и увеличивает дисперсию фона. Масса пробы в практических целях принимается 150—200 г, что требует при пробоотборе удаления из ее состава крупнообломочного материала. Этой же цели служит последующий просев воздушно-сухой пробы.

Вопрос о наилучшей фракции, которую следует отсевать из пробы для ее передачи на анализ, однозначного решения не имеет. Некоторые рудные элементы в форме тяжелых устойчивых минералов (например, SnO_2) способны обогащать грубозернистые фракции аллювия, другие концентрируются преимущественно в илисто-глинистых фракциях, часто в безминеральной форме (например, Mo, U). Обогащение какой-либо фракции рудным элементом еще не говорит о ее поисковых преимуществах, при этом возможен одновременный рост фоновых содержаний и стандартного множителя, т. е. снижение контрастности геохимических аномалий. Наконец, один и тот же рудный элемент в непосредственной близости к месторождению обогащает крупные фракции аллювия, а по мере удаления от коренного источника контрастность аномалий возрастает в тонких фракциях. Поскольку при поисках положение объекта заранее неизвестно, отдать предпочтение какой-либо фракции с этих позиций невозможно. Вследствие такой неопределенности решение этого вопроса переносится в другую плоскость: отсевать для передачи на анализ следует ту мелкую фракцию полевых проб, извлечение которой не встречает затруднений и выход которой в количестве порядка 50 г обеспе-

чен без увеличения массы исходных проб. В итоге при литохимических поисках по гипергенным ореолам и потокам рассеяния чаще всего на анализ передаются фракции —1,0 или —0,5 мм. Более подробного обоснования требует вопрос о сети пробоотбора [1].

Литохимические съемки по потокам рассеяния, как правило, проводятся в геологически слабо изученных, экономически менее развитых и часто труднодоступных районах. В этих геолого-экономических условиях на первой стадии стратегической целью поисковых работ является обнаружение только крупных месторождений. Попутное выявление мелких месторождений следует рассматривать как нежелательный «информационный шум». Опробование аллювиально-пролювиальных отложений временных водотоков с малыми площадями водосборов ($S_x \to 0$) способно привести к обнаружению именно мелких месторождений и непромышленных рудопроявлений, что противоречит стратегической цели поисков и бесплодно увеличивает трудоемкость работ. Очевидно, что детальность пробоотбора должна определяться исходя из минимального размера месторождений, подлежащих обнаружению. На первой стадии при поисках месторождений с «легко доказуемыми запасами» (см. рис. 10, *а*) их размеры определяют площадные продуктивности ореолов и потоков рассеяния P, P', пропорциональные продуктивности коренного оруденения $P_р$ м^2 % на уровне современной поверхности. Обнаружение объекта поисков при геохимических съемках определяется условием $C_x \geqslant C_А = C_ф \varepsilon^3$. В потоке рассеяния максимальные содержания рудных элементов в наиболее общем случае приурочены к точке R, ниже которой аномальные содержания только падают. Задаваясь условием

$$C'_{\max} \geqslant C'_{ф}\varepsilon^3 = (P/S_R) + C'_{ф}, \quad \text{имеем}$$

$$S_R \leqslant \frac{P}{C'_{ф}(\varepsilon^3 - 1)} = S_{критич}. \qquad (49)$$

Эта зависимость, отвечающая идеальному потоку рассеяния, позволяет определить, при какой максимальной площади водосбора $S_{критич}$ объект с заданной продуктивностью вторичного ореола рассеяния P м^2 % будет обнаружен путем опробования аллювиальных отложений. Объект той же продуктивности, находящийся внутри площади $S_x > S_{критич}$, литохимическими съемками по потокам рассеяния выявлен не будет, хотя объекты с величиной $P > P_{критич}$ в тех же условиях будут выявлены. С учетом убывания S_x к вершинам водосборов условие $S_{\min} \leqslant S_{критич}$ при заданном $P_{\min}$ определяет допустимость прекращения пробоотбора по мере приближения к водоразделам без снижения поисковой эффективности литохимических съемок. В точках прекращения пробоотбора при $S_x \leqslant S_{\min}$

принято отбирать две пробы с расстоянием между ними 20—30 м. При пешеходной съемке пробоотбор обычно ведется с шагом 500—1000 м, учитывая, что трудоемкость работ в основном определяется протяженностью маршрутов. Пример целесообразного размещения точек пробоотбора при съемках, отвечающих масштабу 1 : 500 000, показан на рис. 22. Здесь $S_{\min} \leqslant 10$ км, $C_ф' = 1 : 10^{-5}$ %, $\varepsilon = 1{,}44$ и $C_А' = 3 \cdot 10^{-5}$ %. Отбор проб прекращается в устьях рек II порядка, реки I порядка опробуются только при их впадении непосредственно в реки III и старших порядков, шаг пробоотбора 500 м. На участке имеются два минимально-промышленных рудных объекта с продуктивностями вторичных ореолов рассеяния $P_{\min} = 400$ м^2 % каждый. В пределах 100 км^2, представляющих собой фрагмент площади съемок, отобрано 22 рядовых и 9 двойных проб за №№ 1—40, что отвечает средней плотности 1 проба на 2,5 км^2, т. е. расчетной сети 5×0,5 км.

Рудный объект А надежно выявляется литохимическими съемками этого масштаба. Его вторичные ореолы рассеяния распределяются примерно поровну между двумя водосборами I—II порядков, площадью $S_{28,29} \approx 5$ км^2 и $S_{33,34} \approx 10$ км^2. В результате в пробах 28 и 29 содержания рудного элемента составят $5 \cdot 10^{-5}$ %, в пробах 33 и 34 — $3 \cdot 10^{-5}$ %. Кроме того, в восьми пробах (21, 22, 25—27 и 30—32) содержания металла будут 2—$2{,}5 \cdot 10^{-5}$ %, т. е. аномальными по критерию $C_ф \varepsilon^{3/\sqrt{m}}$. Рудный объект Б, оказавшийся в бассейне русла IV порядка, в условиях идеального потока рассеяния, съемками не обнаруживается. Точке R в этом случае соответствует площадь водосбора $S_R = S_x = 74$ км$^2 > S_{критич} = 20$ км^2, максимальное содержание составляет $C'_{\max} = C_R' = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ % $< C_А$. В пределах рис. 22 $\Sigma S_{\min}$ составляет примерно 75 % от общей площади участка. Достаточно очевидно, что продление опробования в сторону водоразделов было бы бесполезным. Эти расчеты ожидаемых результатов литохимической съемки были основаны на закономерностях формирования идеальных потоков рассеяния. В природных условиях наблюдаются отступления от этих зависимостей. Нарушение условия $P_x' = \text{const}$, осложняющее интерпретацию потоков рассеяния, одновременно играет позитивную роль, увеличивая поисковые возможности литохимической съемки. Это положение иллюстрируют три кривые $C_x' = f(S_x)$, показанные на рис. 23. При значениях $\alpha' = 1{,}0$, когда поток рассеяния формируется по законам идеальной модели, рудное месторождение с продуктивностью 400 м^2 % Ag (или Hg) при $S_R = 50$ км^2 заведомо не выявляется, поскольку $S_{критич} = 20$ км^2 и содержания рудного элемента во всех точках опробования остаются ниже $C_А'$ (на рис. 23 показаны пунктиром). Уже при $\alpha' = 3$ в двух пробах, а при $\alpha' = 10$ в семи пробах содержания металла становятся аномальными и этот же рудный объект надежно обнаруживается. Обобщая эти данные, на основе зависимости (47) устанавливаем, что в реальных пото-

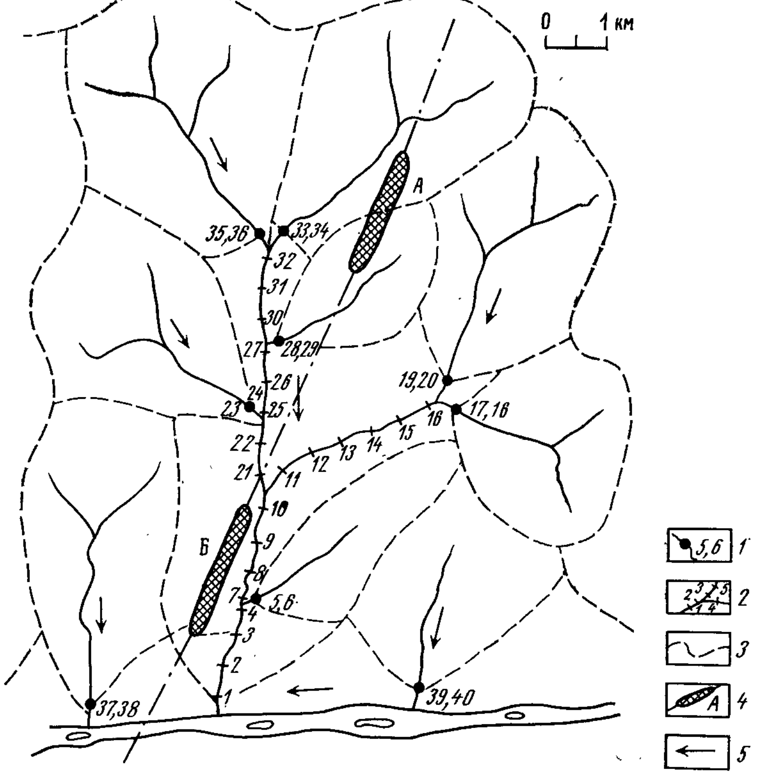


Рис. 22. Пример размещения точек пробоотбора при съемках масштаба 1 : 500 000.

Точки отбора проб: *1* — двойных; *2* — рядовых; *3* — водоразделы; *4* — рудные объекты; *5* — направление стока

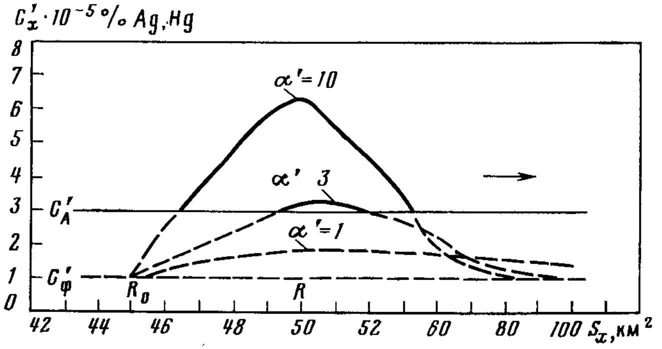


Рис. 23. Графики обнаружеиия объекта поисков при $S_x > S_{крит}$ и $\alpha^4 \geqslant 3$, $Q_{100} = 1000$ т, $P' = 400$ м² %, $S_{крит} = 20$ км², k^4 и $k = 1$.

Стрелкой показаио иаправление стока

ках рассеяния $S_{критич}$ или при заданном C_R — содержание металла ($C'_{max} - C_ф'$) увеличивается в $1/\lambda'$ раз против идеальных условий. В зависимости от местных значений α' и соотношений S_{R_0}/S_R это превышение может достигать 20-, 30- и даже 50-кратной величины, что существенно повышает поисковые возможности литохимической съемки по потокам рассеяния. Обращаясь к рис. 22, можно подсчитать, что рудный объект Б, не выявляемый в условиях идеального потока рассеяния, при имеющемся соотношении водосборов $S_{R_0}/S_R = 0{,}88$, надежно обнаруживается по аномальным содержаниям металла, начиная с $\alpha' \geqslant 4{,}7$. Дополнительные резервы возникают при $k' > 1{,}0$ (например, Au, Sn), понижаются поисковые возможности при $k' < 1{,}0$. Таким образом, пробоотбор с шагом 0,5—1,0 км по руслам рек старших порядков с водосборами до нескольких сотен квадратных километров следует считать целесообразным, и нет необходимости литохимические съемки по потокам рассеяния до получения их результатов дополнять профильным опробованием элювио-делювия прилегающих склонов.

Определение местной величины k' производится на участках выявленных потоков рассеяния рудных элементов, на которых затем проводится литохимическая съемка масштаба 1 : 100 000 или крупнее по вторичным ореолам рассеяния. Для оценки частных значений k' по данным этих съемок по формуле (16) подсчитываются площадные продуктивности той части вторичных ореолов рассеяния, которые по условиям склоновой денудации тяготеют к определенным точкам пробоотбора из русловых отложений. Для тех же точек опробования по формуле (35) подсчитывается продуктивность потоков рассеяния с обмером площади водосбора S_x по топографическим картам или по аэрофотоснимкам. Значения k' вычисляются до второго знака после запятой как частное от деления $P'_{ист}$ на P. Для найденных n значений k', отвечающих однотипным условиям, вычисляется среднее геометрическое $\tilde{k}'$ и по величине размаха k'_{max}/k'_{min} — стандартный множитель ε, определяющий доверительные пределы оценки $\tilde{k}' \cdot \varepsilon^{\pm 1}$, где $\varepsilon = \text{antlg}\, S_{lg}/\sqrt{n}$. Аппроксимация статистического распределения k' логнормальным законом основана на том, что средним из двух равновероятных значений множителя пропорциональности 2,0 и 0,5 является $1{,}0 = \sqrt{2 \cdot 0{,}5}$, а не $1{,}25 = \frac{2 + 0{,}5}{2}$.

Пример определений $\tilde{k}'$ для потоков рассеяния свинца в условиях высокогорного рельефа Угамского хребта (Ю. Казахстан) показан на рис. 24. Общее среднее геометрическое значение для Pb, найденное из 81 определения по этому району, оказалось достаточно близким к 1,0. Конкретные значения k' для некоторых рудных районов приведены в табл. 11.

В условиях активной водной (гидрохимической) миграции

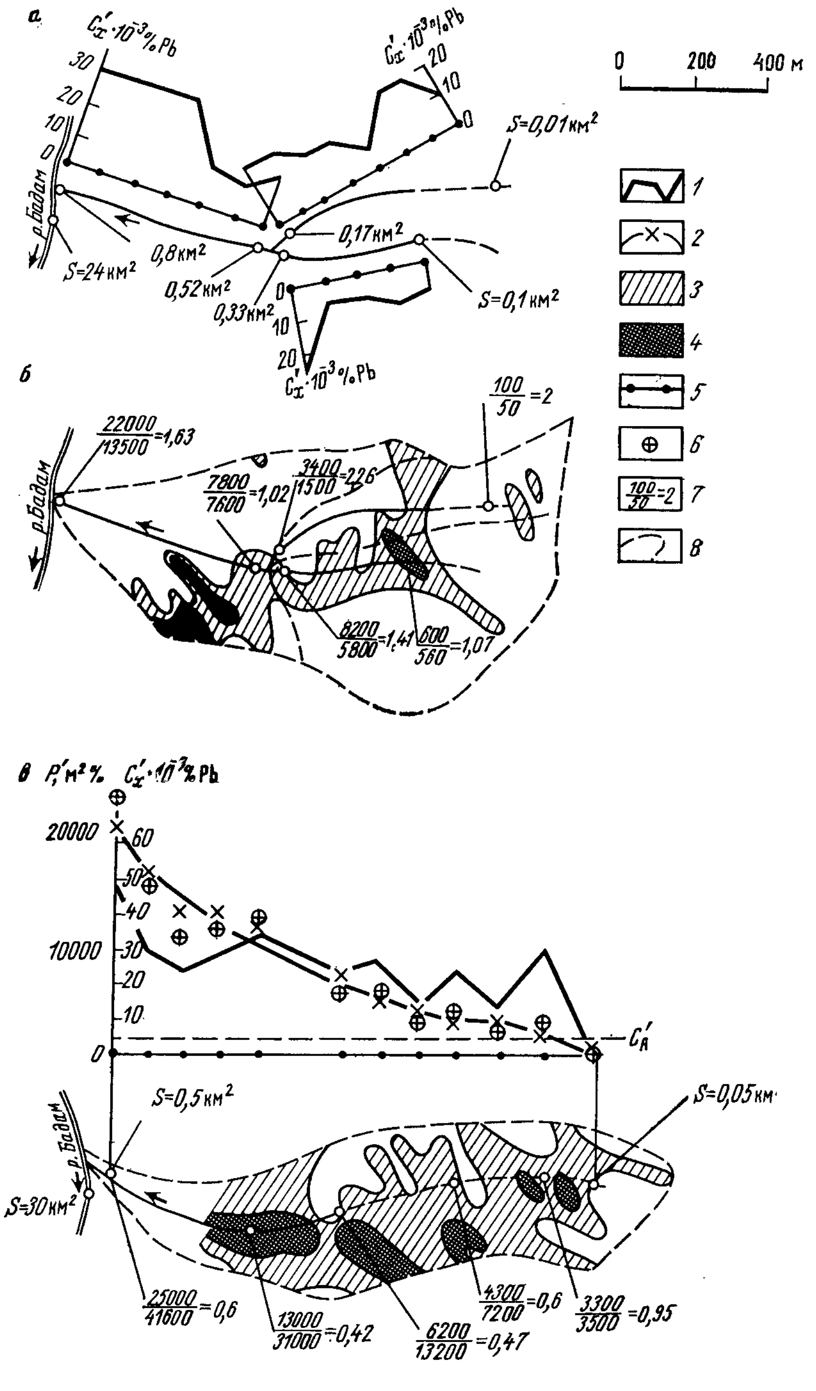


Таблица 11

Значения k'

№ п/п *	Рудный элемент	Число определений	Оценка	№ п/п	Рудный элемент	Число определений	Оценка
1	Pb	7	$1,21\cdot1,39^{\pm1}$	11	Ag	26	$0,88\cdot1,63^{\pm1}$
2	Ag	8	$0,16\cdot1,33^{\pm1}$	12	Sn	19	$1,44\cdot1,98^{\pm1}$
3	Cu	10	$0,97\cdot1,09^{\pm1}$	13	Bi	18	$1,29\cdot1,60^{\pm1}$
4	Sn	6	$1,46\cdot1,37^{\pm1}$	14	As	21	$1,17\cdot1,59^{\pm1}$
5	Pb	11	$1,61\cdot1,18^{\pm1}$	15	Pb	8	$1,11\cdot1,10^{\pm1}$
6	Zn	9	$0,86\cdot1,31^{\pm1}$	16	Zn	6	$1,12\cdot1,41^{\pm1}$
7	Mo	10	$2,06\cdot1,08^{\pm1}$	17	Ag	5	$1,30\cdot1,26^{\pm1}$
8	U	7	$1,13\cdot1,12^{\pm1}$	18	Mo	4	$2,23\cdot1,15^{\pm1}$
9	Pb	25	$1,06\cdot1,74^{\pm1}$	19	As	3	$1,47\cdot1,21^{\pm1}$
10	Zn	25	$2,75\cdot1,71^{\pm1}$	20	Ba	2	$3,77\cdot1,15^{\pm1}$

* Данные: 1—4 — А. Д. Ананченко по северу Камчатской области; 5—8 — А. Н. Боголюбова по Средней Азии; 9—14 — В. П. Бородина по Омсукчанскому району Магаданской области; 15—20 — С. А. Миляева по горным районам Казахстана.

элементов при резком изменении обстановки возможно их осаждение в русле на геохимических барьерах. Возникающие при этом вторичные (гипергенные) аккумуляции элементов со значениями $k' \gg 1,0$ могут затруднять количественную интерпретацию потоков рассеяния.

Образование их на испарительном барьере отмечалось для Sr, B, F, иногда Mo, на восстановительном барьере — для U и Mo. В пределе гипергенные аккумуляции достигают промышленного масштаба, приобретая значение экзогенных месторождений полезных ископаемых.

Другую группу рудных элементов, потоки рассеяния которых способны характеризоваться значениями $k' \gg 1,0$, образуют золото, платина и другие элементы, представленные тяжелыми, устойчивыми в зоне выветривания минералами, такими, как касситерит, монацит, колумбит, танталит, ильменит, рутил, отчасти вольфрамит. Благодаря высокой плотности и механической прочности эти минералы способны к накоплению на

Рис. 24. К оценке коэффициентов пропорциональности k' между количеством свинца в потоках и ореолах рассеяния для водотоков Сай № 13 (*а, б*) и Сай № 10 (*в*). *По А. П. Соловову и Н. Я. Кунину.*

Графики: *1* — содержаний Pb; *2* — усредненных значений P'_x. Ореолы рассеяния: *3* — Pb ⩾0,02 %; *4* — Pb ⩾0,1 %. *5* — точки опробования потока; *6* — вычисленные значения P'_x; *7* — $P'/P=k'$; *8* — контур бассейна денудации

гравитационном барьере, образуя в отложениях гидросети аллювиальные россыпи с большим и весьма непостоянным коэффициентом обогащения. Особенно большая плотность ($d = 19{,}3$ г/см^3) и сложность процессов гидравлической сортировки делают непредсказуемыми местные значения k' для золота в каждом конкретном русле. Поэтому в настоящее время оценка прогнозных ресурсов золоторудных месторождений по продуктивности потоков рассеяния золота по формуле (39) не производится. Литохимические потоки рассеяния платины ($d = 21{,}4$ г/см^3) еще очень плохо изучены. Для большинства остальных рудных элементов в условиях горного рельефа для ориентировочных расчетов можно при недостатке данных принимать $k' = 1{,}0$, считая, что действительные значения коэффициента пропорциональности не могут изменить порядка ожидаемых цифр. В условиях слабо расчлененного и близкого к равнинному рельефа возможность количественной интерпретации литохимических потоков рассеяния становится сомнительной.

Самостоятельную проблему составляет методика литохимических поисков рудных месторождений в районах со сплошным покровом моренно-ледниковых отложений ограниченной мощности, к числу которых принадлежат значительные территории Кольского полуострова, Карелии, Финляндии и Канадского щита. Опыт показывает, что в этих условиях возможно обнаружение ледниковых потоков рассеяния рудных месторождений.

Направленное рассеяние выражено особенно четко в ледниковом веере рудных валунов, путем регистрации которых в прошлые годы были открыты многие месторождения Финляндии. В этих случаях остаточный (механический) характер литохимической аномалии в морене не вызывает сомнений. В других случаях, по мнению Н. Ф. Майорова [25], вторичные ореолы и потоки рудных месторождений в моренно-ледниковых отложениях имеют наложенную солевую природу. Наиболее близки к потокам рассеяния литохимические аномалии в морене, транспортируемой в основании долинных ледников. Типичные литохимические потоки рассеяния рудных месторождений могут возникать в составе флювиогляциальных отложений межледниковых периодов или в русловых отложениях современной речной сети, расчленяющей отложения донной морены на обширных пространствах ледниковых равнин.

Глава 5

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ, АТМОХИМИЧЕСКИЙ И БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Различные геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых — лито, гидро-, атмохимический и биогеохимический применяются в объемах, определяемых конкурентной оценкой их геолого-экономической эффективности. Если для поисков могут успешно применяться два, три или все четыре геохимических метода, выбирается один, реже целесообразное сочетание двух методов, с помощью которых геологическая задача решается наиболее полно и с наименьшими затратами. Взаимосвязанность и взаимообусловленность геохимических аномалий в различных геосферах (см. раздел 1.7, рис. 11), позволяют предвидеть определенную степень сходства между результатами геохимических съемок различными методами. Однако простое совпадение аномалий, выявляемых двумя или несколькими геохимичесикми методами, не может оправдать их совместное применение.

Наиболее широко геохимические методы применяются при поисках месторождений твердых полезных ископаемых, в основном эти работы ведутся литохимическими методами. По зарубежным данным [50], в мире ежегодно с этой целью отбирается порядка 18 млн. геохимических проб, из которых 97,5 % — литохимические, 2 % — гидрохимические и 0,5 % — биогеохимические. Атмохимический метод применяется преимущественно при поисках месторождений нефти и газа, данные о годовых объемах этих работ отсутствуют. Суммарные объемы атмохимических съемок, выполняемых с целью поисков месторождений горючих, рудных и нерудных полезных ископаемых, пока значительно уступающие объему литохимических съемок, в ближайшее время существенно возрастут. При общей тенденции к медленному увеличению годовых объемов поисковых литохимических, гидрохимических и биогеохимических съемок соотношения между ними, по-видимому, стабилизовались.

Пропорционально роли и перспективам дальнейшего развития каждого из геохимиечских методов поисков кратко рассматриваются принципиальные основы гидрохимического и биогеохимического методов и более подробно — атмохимического метода.

5.1. ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Гидрохимические поиски месторождений полезных ископаемых основаны на исследовании химического состава природных поверхностных и подземных вод. Принципиальную основу этого метода составляют способность воды к растворению горных

пород, ее активное участие в химических превращениях минералов и свойства воды как подвижной среды. Связь между химическим составом воды и наличием вблизи водоисточника залежей полезных ископаемых не вызывает сомнений и является одной из причин возникновения гидрохимических аномалий, имеющих поисковое значение. Способность воды к перемещению из глубоких горизонтов к земной поверхности и ее всепроникающие свойства издавна привлекали внимание к опробованию природных вод в поисковых целях.

Наиболее благоприятными объектами для гидрохимических поисков являются месторождения минеральных солей — различных природных хлоридов и сульфатов. Суммарное содержание этих соединений в природных рассолах может превышать 350 г/л, и они способны устойчиво сохраняться в растворах, определяя в конечном счете солевой состав океанической воды (Σ солей 35,6 г/л). Учитывая, что общая минерализация природных пресных, в том числе речных, вод обычно составляет 1,0—0,5 г/л, легко оценить тот большой диапазон, в котором могут лежать аномальные содержания солей в поверхностных и подземных водах суши.

В силу особенностей формирования солеродных бассейнов в качестве крупных и стратиграфически фиксированных геологических образований гидрохимические поиски месторождений минеральных солей не получили широкого распространения, хотя прогнозы характера соленосных отложений по химическому составу природных вод делались Н. С. Курнаковым и П. И. Преображенским еще в начале века. Бесспорное практическое значение сохраняет гидрохимический метод поисков месторождений калийных солей, разработанный М. Г. Валяшко. Эффективное применение гидрохимического метода возможно при поисках минеральных источников, в частности промышленных бромных вод и месторождений боратов. В числе других активных водных мигрантов эти элементы характеризуются повышенными величинами коэффициентов талассофильности (Br—τ_x=30; B—τ_x=0,4).

Активное развитие гидрохимического метода поисков рудных месторождений началось в нашей стране в начале 50-х годов, после первых публикаций Е. А. Сергеева и О. А. Алёкина. Основные исследования в этой области проводили С. П. Албул, А. А. Бродский, В. В. Поликарпочкин, П. А. Удодов, затем Г. А. Голева, С. Р. Крайнов, С. Л. Шварцев и многие другие. Гидрохимические методы поисков месторождений нефти и газа разрабатывали В. А. Сулин, В. А. Ковда, П. С. Славин, Л. А. Гуляева.

Среди рудных месторождений наиболее благоприятными объектами гидрохимических поисков являются сульфидные, в первую очередь колчеданно-полиметаллические и особенно богатые дисульфидами медноколчеданные месторождения. Природные воды обогащаются рудными элементами главным образом при гипергенном окислении сульфидных руд, в ходе которого труд-

норастворимые, но неустойчивые сульфиды до превращения в устойчивые и труднорастворимые вторичные минералы проходят стадию легкорастворимых сульфатов. Подробно этот процесс рассмотрен в разд. 3.4, данные о растворимости минералов приведены в табл. 14.

В подземных водах, омывающих окисляющееся сульфидное месторождение, образуются гидрохимические ореолы и потоки рассеяния рудных элементов и сульфат-иона. Содержания рудных элементов в кислых рудничных водах активно окисляющихся колчеданных залежей могут достигать огромной величины (в мг/л): Cu — 45600, Zn — 50300, Ni — 30000 и т. п. [27]. В результате взаимодействия с окружающими водами и минералами горных пород, обменных химических реакций, соосаждения и сорбции рудные элементы из растворов переходят в твердую фазу и содержания их быстро падают до фоновых. Направленность этого процесса отражают цифры средних содержаний рудных элементов в природных водах зоны гипергенеза, лежащие в пределах $n \cdot 10^{-2}$ — $n \cdot 10^{-5}$ мг/л и особенно их коэффициенты талассофильности (табл. 18).

Цифры τ_x показывают, что содержания рудных элементов в литосфере в сотни раз и даже в десятки тысяч раз больше, чем в гидросфере. Одна из причин, определяющих эти соотношения, — выпадение гидроксидов большинства металлов уже при значениях pH<7,0, в то время как природные воды чаще всего имеют нейтральную или слабо щелочную реакцию. Труднорастворимые оксиды, карбонаты, силикаты, фосфаты рудных элементов и другие конечные продукты окисления сульфидных минералов характеризуются ничтожными значениями произведения растворимости. Существенную роль в переходе рудных элементов из раствора в твердую фазу играет соосаждение с гидроксидами Fe и Al, выпадение которых начинается в кислых растворах: $Fe(OH)_3$ при pH 2,5, $Al(OH)_3$ при pH 4,2. Универсальное значение имеют процессы сорбции рудных элементов на органических и минеральных коллоидах, в частности при коагуляции гелей кремнезема, на гидроксидах Mn и многочисленных глинистых минералах. При многослойной сорбции анионов и катионов первоначальный знак заряда коллоидной частицы роли не играет.

Несмотря на все эти процессы «самоочищения» природных вод от содержаний рудных элементов, их повышенные, аномальные концентрации сохраняются в речных и подземных водах на расстояниях до 500—1000 м, иногда до нескольких километров от месторождений. Определяется это разнообразием форм нахождения рудных элементов в сложных многокомпонентных системах, которые представляют собой природные воды. Миграция рудных элементов в водах протекает в виде простых ионов, комплексных неорганических соединений с различными лигандами, в частности в анионной форме, а также в виде различных металлорганических соединений повышенной растворимости [24].

Таблица 18

Гидрохимические характеристики рудных элементов [27, 29]

Элемент	Средние содержания в водах зоны гипергенеза, мг/л	τ_x	Начало осаждения гидроксидов		ПР	Поведение в зоне гипергенеза
			Катион	pH		
Pb	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	Pb^{2+}	6,0	$7 \cdot 10^{-16}$	Соосаждение с гидроксидами Fe, Mn; образование окислов, карбонатов, фосфатов; сорбция
Zn	$3{,}4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	Zn^{2+}	5,2	$4{,}5 \cdot 10^{-17}$	Соосаждение с гидроксидами Fe; образование карбонатов и силикатов; в растворе комплексные соединения
Cu	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	Cu^{2+}	5,4	$1{,}6 \cdot 10^{-19}$	Соосаждение с гидроксидами Fe; Al; сорбция; образование гидрокарбонатов и силикатов
Ni	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	Ni^{2+}	6,7	$8{,}7 \cdot 10^{-19}$	Сорбция гелями SiO_2 и гидроксидами макроэлементов; образование гидросиликатов
Co	$8{,}3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	Co^{3+} Co^{2+}	— 6,8	$2{,}5 \cdot 10^{-46}$ $1{,}3 \cdot 10^{-15}$	Сорбция минералами глин и органическим веществом; соосаждение с гидроксидами Fe, Mn
Sn	$4{,}1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	Sn^{4+} Sn^{2+}	2,0 3,0	$1 \cdot 10^{-57}$ $1 \cdot 10^{-27}$	Высокая устойчивость SnO_2
W	$(1 \cdot 10^{-4})$	$7{,}7 \cdot 10^{-2}$	W^{6+}	—	—	Хемосорбция гидроксидом Fe; соосаждение с $CaCO_3$; образование вольфраматов; в растворе комплексные анионы
Mo	$2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-4}$	Mo^{4+}	—	$1 \cdot 10^{-50}$	Сорбция; соосаждение с гидроксидами Fe и $CaCO_3$; образование молибдита и повеллита; в растворе комплексные соединения
Sb	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Sb^{3+}	0,9	$4 \cdot 10^{-42}$	Высокая устойчивость вторичных оксидов Sb; в растворе комплексные соединения
Hg	$9{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	Hg^{2+}	7,0	$3 \cdot 10^{-26}$	Связывание Cl^-; сорбция
Ag	$2{,}9 \cdot 10^{-4}$	$4{,}3 \cdot 10^{-3}$	Ag^{+}	9,0	$2 \cdot 10^{-8}$	Связывание Cl^-; самородное состояние
Au	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-4}$	Au^{+}	—	$1 \cdot 10^{-53}$	Самородное состояние

Практика гидрохимических исследований подтверждает несомненную реальность обнаружения при поисках водных ореолов и потоков рассеяния рудных месторождений. В течение последних 30 лет гидрохимические поиски в тех или иных объемах проводятся в рудных районах СССР. При проверке гидрохимической аномалии, выявленной Е. Е. Кузьминым в долине р. Хараелах (Красноярский край), первые же скважины вскрыли сульфидные руды, что способствовало открытию медно-никелевого месторождения.

Действующая Инструкция [21] указывает на целесообразность применения гидрохимического метода в закрытых районах при поисках глубокозалегающих рудных месторождений в масштабах 1 : 200 000—1 : 25 000, что несомненно оправдано. Основные типы водных ореолов рассеяния скрытого оруденения, выделяемые при гидрохимических поисках, показаны на рис. 82; сходные данные приведены в Инструкции [21, рис. 5]. Продолжаются попытки проведения гидрохимических поисков и в открытых горных районах в качестве конкурирующих с литохимическими съемками. Потоки рассеяния рудных месторождений, выходящих на поверхность, формируются в горных районах за счет склоновой денудации и дефлюкции остаточных ореолов рассеяния, образованных устойчивыми минералами окисленных руд. Солевая составляющая этих литохимических потоков рассеяния играет подчиненную роль. Расчеты показывают, что доля растворимого стока рудных элементов в горных районах Сибири лежит в пределах 0,1—0,5 % от объема их общего стока [25, 42]. Для горных рек аридной зоны доля растворимого стока многократно уменьшается. В этих условиях преимущества опробования в поисковых целях твердой фазы стока вполне очевидны.

При обсуждении методических возможностей гидрохимических поисков нередко ссылаются на их повышенную глубинность, без учета взаимосвязанности гидро- и литохимических аномалий, обусловленной фазовыми переходами. Тезис о «повышенной глубинности» гидрохимического метода поисков был выдвинут В. И. Красниковым в 1956 г. и затем многократно повторен в работах других авторов. Схемы В. И. Красникова, иллюстрирующие эту повышенную глубинность, опубликованные им в 1959 г., неоднократно перепечатывались и вошли в учебные пособия для вузов [28], и потому их рассмотрение является необходимым. Представления В. И. Красникова (рис. 83) были бы верны, если бы не существовало взаимодействие между природными водами и вмещающими их горными породами. Между тем на всем пути движения ореольных вод и особенно на их выходах к поверхности в форме родников происходят процессы, при которых равновесие в распределении рудных элементов сдвигается в пользу твердой фазы. Именно те реакции, которые положены в основу методов анализа водных проб, — соосаждение с гидроксидом алюминия или с $CaCO_3$, экстракция на различных органических и минеральных сорбентах в природной обста-

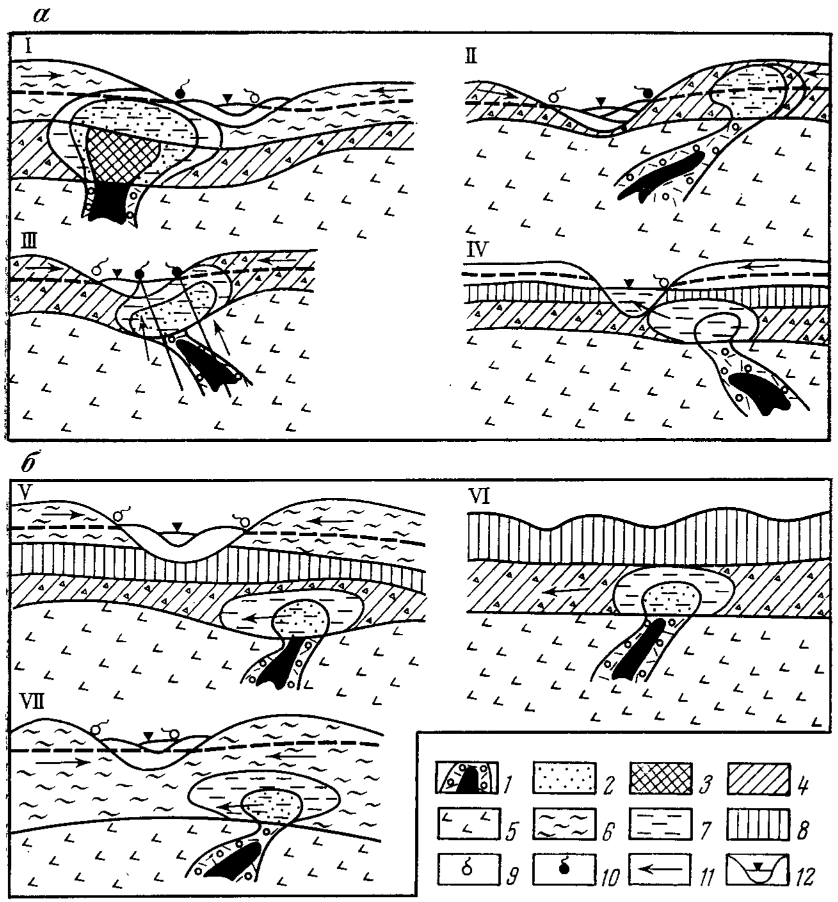


Рис. 82. Основные типы водных ореолов рассеяния. *По Г. А. Голевой.*

а — открытые ореолы (типы I—IV); *б* — закрытые ореолы (типы V—VII).
1 — рудное тело н его первичный ореол; *2* — вторичный ореол рассеяния; *3* — окисленные руды; *4* — кора выветривания (водопроницаема); *5* — рудовмещающие породы; *6* — осадочные водоносные породы; *7* — водиый ореол рассеяния; *8* — водоупорный горизонт: *8, 10* — родники с фоновым *(9)* и аномальным *(10)* содержанием рудных элементов; *11* — направление двнжения вод; *12* — местный базис эрозии

новке происходят непрерывно и самопроизвольно. Поэтому стандартное литохимическое опробование аллювия рек, стенок и дна родников гарантирует получение тех же результатов, которые способно дать гидрохимическое опробование, и нет оснований предполагать его преимущественную глубинность.

Сказанное целиком относится к данным рис. 82: открытые водные ореолы типа *I—IV* с успехом могут быть обнаружены литохимическим опробованием, и применение гидрохимического метода поисков рудных месторождений в этих условиях возможно, но нецелесообразно. Напротив, для обнаружения закрытых водных ореолов типа *V—VII* гидрохимическое опро-

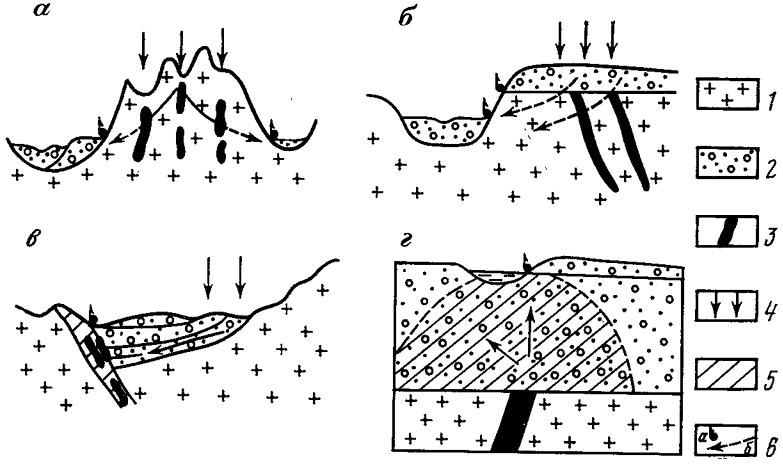


Рис. 83. Схемы В. И. Красикова для доказательства повышенной глубинности гидрохимических поисков.

а — г — различные условия залегания рудных тел.
1 — рудовмещающие породы; *2* — перекрывающие отложения; *3* — рудные тела; *4* — атмосферные осадки; *5* — диффузионный геохимический ореол; *6* — точки пробоотбора *(а)* и направление движения воды *(б)*

бование подземных вод, возможно, является наиболее надежным методом поисков скрытого оруденения. Гидрохимические аномалии формируются в результате сложного процесса, в котором решающая роль принадлежит растворяющему действию и восходящему движению подземных вод, что создает возможность обнаружения месторождений, залегающих ниже современного базиса эрозии.

Характеризуя гидрохимический метод поисков, следует отметить зависимость его результатов от сезонных колебаний уровня грунтовых вод, выпадения атмосферных осадков и режима гидростока рек, за короткий отрезок времени изменяющегося в сотни раз. Это определяет неустойчивость количественных параметров гидрохимического фона — переменные и часто «нулевые» (н. о.) значения $C_ф$, большую или неизвестную величину стандартного множителя ε, плохую воспроизводимость и малую контрастность гидрохимических аномалий. Как правило, в монографиях и методических руководствах по гидрохимическому методу поисков сведения о местных значениях ε отсутствуют, а взамен показателя контрастности γ приводятся данные о максимальной величине коэффициента концентрации $(K_к)$, вычисленного по отношению рудничных (техногенных) вод к фоновым, величина которого еще не характеризует поисковых возможностей съемки. Все это затрудняет количественный анализ гидрохимического поля и создание надежных методов оценки прогнозных ресурсов металла путем интерпретации гидрохимических аномалий.

Известно, что важнейшим методом поисков рудных месторождений в горных районах являются литохимические съемки по потокам рассеяния с плотностью 1 проба на 1 км^2. Стоимость и результаты этих работ следует сопоставлять с гидрохимическими съемками при той же плотности пробоотбора. Отбор и анализ лито- и гидрохимических проб в одних и тех же точках современной гидросети никаких преимуществ гидрохимического метода не обнаруживает.

Ярчайшей гидрохимической аномалией, фиксирующей скрытое медноколчеданное месторождение под чехлом юрских конгломератов и палеоген-четвертичных глин мощностью до 100 м, является сульфатное озеро Гай на Южном Урале (рН 1,1, содержание меди — до 1 г/л). В истории открытия этого месторождения гидрохимическому методу отводится определенная роль при обнаружении пятой слепой залежи. Непосредственно над погребенным Гайским месторождением развит чрезвычайно яркий и обширный наложенный литохимический ореол рассеяния, детально изученный М. А. Глазовской. Обнаружение этого месторождения поисковыми литохимическими съемками было гарантировано без обращения к более сложной технике гидрохимических съемок. Разведка бурением самой яркой гидрохимической аномалии в Центральном Казахстане, известной под названием Жорга, с сернокислыми, медьсодержащими водами не привела к открытию промышленных руд. В результате проходки десяти разведочных скважин были встречены только пиритизированные породы с содержанием меди не более 0,1 %.

В данном случае яркость гидрохимической аномалии могла быть обусловлена относительно обильной пиритизацией пород и малым количеством атмосферных осадков в условиях аридного климата. Слабость аппарата количественной интерпретации гидрохимических аномалий, представляющих собой сложную кинетическую систему, не позволяет дать однозначную оценку результатов этого бурения. Приуроченная к этому участку бедная литохимическая аномалия имела весьма скромные размеры.

Вопрос об эффективном применении гидрохимического метода поисков по-прежнему стоит весьма остро, и область таких геологических задач, несомненно, существует. Это, в частности, поиски месторождений калийных солей и, очевидно, бром- и иод-содержащих минеральных вод. Месторождения калийных солей образуются в заключительную стадию развития солеродных бассейнов, после отложения из сгущающейся морской воды карбонатов и сульфатов кальция, подавляющей части галита и части сульфата магния. В стратиграфической колонке нормальных соляных отложений калийные соли занимают верхнее положение и подстилаются мощными отложениями галита. При этом для реализации процесса отложения калийных солей необходимы соответствующие геологические условия.

М. Г. Валяшко установил, что признаком наступления этих благоприятных условий является резкое возрастание бром-хлор-

ного отношения $\left(\frac{Br}{Cl}\cdot 10^3\right)$ в жидкой фазе сгущающихся рассолов от 3—13 единиц в стадии отложения нормального галита до 14—17 единиц в стадии отложения калийных солей. Непосредственная полевая оценка величины этого показателя, по-видимому, должна быть одним из условий гидрохимических поисков месторождений калийных солей. Калий принадлежит к числу умеренно активных и слабоподвижных водных мигрантов, его коэффициенты водной миграции K_x лежат в интервале 0, n—n, а коэффициент талассофильности τ_x равен 0,016 [29].

Дальнейшему развитию подлежат гидрохимические методы поисков погребенных рудных месторождений, в том числе методы поисков путем опробования вод из скважин и шурфов, пройденных в рыхлых дальнеприносных отложениях и в коренных рудовмещающих породах. Благоприятные условия для решения поисковых задач с помощью гидрохимического метода возникают в условиях, когда в основании чехла лежит водоносный горизонт, а в перекрывающих его отложениях имеются водоупорные горизонты. Примерно такую ситуацию отражает рис. 84, из которого видно, что на Талнахском медно-никелевом месторождении водоносные ледниковые песчано-галечные отложения перекрыты водоупорными суглинками. Литохимический

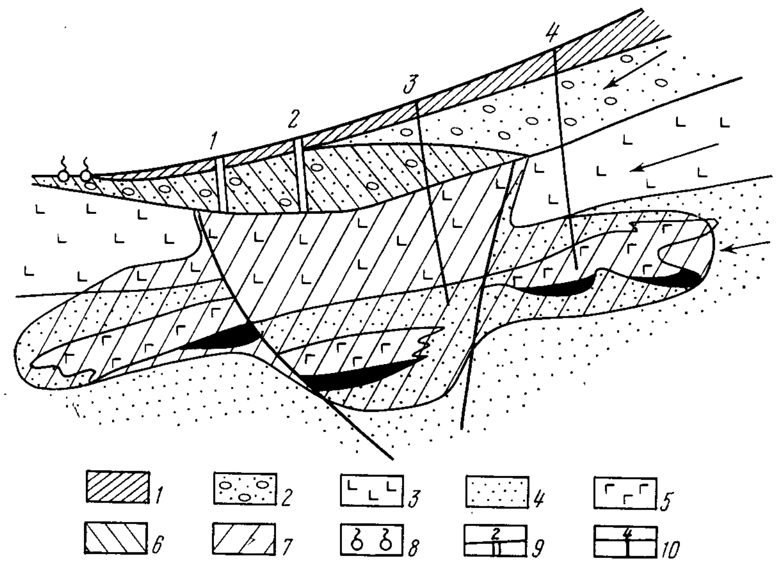


Рис. 84. Схема формирования водных ореолов рассеяния на Талнахском месторождении. *По С. Л. Шварцеву.*

1 — ледниковые водоупорные суглинки; *2* — ледниковые песчано-галечниковые отложения; *3* — базальты различного состава; *4* — алевролиты, аргиллиты, песчаники; *5* — габбро-диабазы; *6—7* — водный ореол рассеяния в рыхлых образованиях *(6)* и в коренных породах *(7)*; *8* — источники с аномальным содержанием тяжелых металлов; *9—10* — скважины, вскрывшие аномальные воды в рыхлых отложениях *(9)* и в коренных породах *(10)*

(наложенный) ореол рассеяния этого месторождения в этих условиях мог не проявиться на дневной поверхности. Заметим, что наличие родников, показанных в левой части рис. 84, необязательно, и гидрохимический ореол мог принадлежать к закрытому типу. Как уже указывалось, поисковые гидрохимические съемки сыграли положительную роль при открытии расположенного в том же районе медно-никелевого месторождения.

Водоносные горизонты, залегающие в основании чехла, способны находиться в активном водообмене с трещинными водами фундамента, что увеличивает геохимическую информативность их опробования при поисках погребенных месторождений. Изоляция этих горизонтов от прямого воздействия атмосферного кислорода, от органических и минеральных коллоидов почв, нередкая «промытость» водоносных кварцевых песков способны сдвигать равновесие в распределении рудных элементов в пользу жидкой фазы. Этим геохимические условия подземных вод отличаются от условий на дневной поверхности при их разгрузке в форме естественных родников.

Чрезвычайно эффективная область применения гидрохимического метода — поиски месторождений зон пластового окисления. Рудные тела этих месторождений, получившие название «роллов», формируются из природных вод на восстановительном барьере (рис. 85). Богатые кислородом атмосферные осадки, фильтруясь через породы гранитного массива, способны обогащаться шестивалентным ураном, хотя содержание в них этого элемента лишь немного выше фонового ($n\cdot 10^{-5}$% U). Поступая в водоносный горизонт осадочных отложений предгорной равнины, эти воды расходуют свой кислород на окисление органического вещества, закисного железа и пирита — обычных компонентов песчаных фаций, отлагавшихся в восстановительных условиях морского дна. На границе между окисленной частью пласта и его исходным состоянием возникает резкая смена геохимических условий и на восстановительном барьере происходит осаждение четырехвалентного урана, вплоть до формирования промышленных руд. Содержание урана в пластовых водах, после прохождения ими восстановительного барьера, падает на целый порядок — до $n\cdot 10^{-6}$ г/л.

В задачу гидрохимических поисков входит локализация интервала подземных вод, в котором происходит смена окислительных условий на восстановительные, сопровождаемая снижением содержания урана в водах. Эта задача успешно решается путем бурения поисковых скважин по принципу дихотомии с их гидрохимическим опробованием [42]. Аналогичным образом могут формироваться гидрогенные месторождения молибдена и селена — элементов с переменной валентностью, способных к отложению на восстановительном барьере. В этих случаях гидрохимический метод незаменим при решении поисковой задачи.

В техническом плане подвижность воды при гидрохимических поисках можно форсировать путем откачек и создания воронок

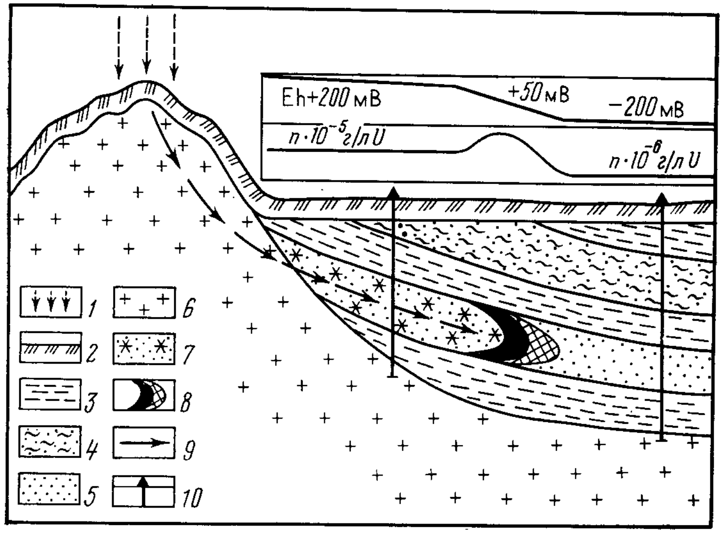


Рис. 85. Схема инфильтрационного месторождения с графиками Eh и содержаний урана в пластовых водах [42].

1 — атмосферные осадки; 2 — четвертичные отложения; 3 — глины; 4 — суглинки; 5 — пески; 6 — гранитоиды; 7 — окисленные породы; 8 — оруденение; 9 — направление движения пластовых вод; 10 — поисковые скважины

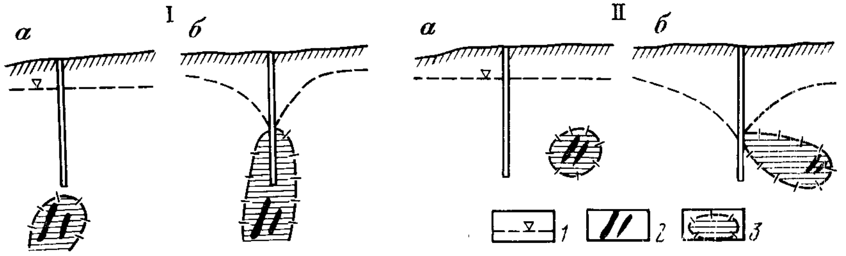


Рис. 86. Положение водного ореола рассеяния до откачки *(а)* и после откачки *(б)*. *По П. А. Удодову и др.*

I — скважина не добурена до зоны минерализации; II — скважина пройдена в стороне от зоны минерализации; 1 — уровень подземных вод; 2 — зона минерализации; 3 — контур водного ореола рассеяния

депрессии. В результате ореольные воды могут приблизиться к стволу скважины и оказаться в зоне гидрохимического опробования (рис. 86).

В целом, не переоценивая самостоятельные возможности гидрохимического метода поисков, следует считать обязательным гидрохимическое опробование любых бурящихся скважин в качестве условия их геологической документации. Появление новейших средств анализа природных вод с помощью ионо-селективных электродов и специальных электронных устройств с цифровой выдачей результатов способно резко повысить эффективность гидрохимических поисков.

Опробование в поисковых целях природных вод и подготовка проб к анализу подчиняется требованиям Инструкции [21]. Отбор проб из открытых водоисточников не представляет трудностей; опробование подземных водоносных горизонтов производится специальными пробоотборниками после промывки скважин и откачки.

Непосредственно у водоисточника помимо определения pH, иногда ΣCu, Pb, Zn, получившей название «суммы металлов», содержаний SO_4^{2-}, Cl^- и HCO_3^- производится концентрирование микроэлементов. Чаще всего для этого применяют методы соосаждения, разработанные в Томском и Ленинградском политехнических институтах, известные под названиями «метод ТПИ» и «метод ЛТИ-ВИТР». Концентрирование по методу ТПИ основано на соосаждении микроэлементов с гидроксидом алюминия в присутствии сульфида натрия, основные компоненты минерализации воды при этом в осадок не выпадают. Метод ЛТИ-ВИТР основан на соосаждении микроэлементов с сульфидом кадмия в присутствии хлорного железа. При некоторых различиях в перечне концентрируемых элементов, обоими методами извлекаются в осадок Zn, Cu, Pb, Co, Sn, Ag, V, Cr, W, Sb, As, Hg, Ti, Nb — в каждом случае около 20 элементов. Осадки отфильтровывают, сушат и направляют на спектральный анализ. Для осаждения Li, Rb и Cs применяются ионо-обменные смолы. При прямом лабораторном анализе водных проб, определяются общая минерализация воды (*M*), Eh, pH, содержание Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, $Fe_{общ.}$, O_2, Ca^{2+}, Mg^{2+}, H_2S и CO_2.

5.2. АТМОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Атмохимические (газовые) поиски месторождений полезных ископаемых основаны на исследовании состава подземной атмосферы — химического состава газов, насыщающих горные породы вблизи дневной поверхности. Если газовый пробоотбор ведется с малой глубины (1—3 м), принято говорить об исследовании подпочвенного воздуха. Современные газовые съемки выполняются с глубиной пробоотбора 20—600 м. Реже исследуется газовый состав приземной атмосферы, хотя именно в этом варианте существенно возрастает оперативность атмохимической съемки. Аэрозольные съемки более правильно относить к числу литохимических методов поисков.

Земную атмосферу в основном слагают три газа — азот (около 78 %), кислород (около 21 %) и аргон (около 1 %), в сумме составляющие 99,94 % ее массы. В переменных количествах в атмосфере присутствуют пары воды; содержание CO_2 — около 0,03 %, содержание остальных газов 10^{-4}—10^{-6} % и менее [28]. Низкий геохимический фон и высокая подвижность химических элементов в газовой фазе создают исключительно

благоприятные условия для формирования атмохимических ореолов рассеяния любых месторождений полезных ископаемых.

Возникновение атмохимического метода поисков, под первоначальным названием «газовая съемка», относится к началу 30-х годов и связано с именем В. А. Соколова [12]. Областью применения этого метода, по замыслу его автора, были поиски месторождений нефти и газа путем определения содержаний углеводородных газов в пробах подпочвенного воздуха. К тому же периоду относится возникновение метода эманационной съемки, при которой в поисковых целях в почвенном воздухе определяются содержания радона и торона. В предвоенные годы газовые съемки с переменным успехом велись во многих нефтеносных районах и в небольших объемах на угольных месторождениях. Эманационная съемка вошла в состав радиометрических методов поисков радиоактивных руд, составляющих самостоятельную, хорошо разработанную область прикладной геохимии.

Позднее определились новые области применения атмохимического метода поисков. Под влиянием идей А. А. Саукова в 1956 г. Е. А. Сергеевым начата разработка газо-ртутного метода [14] поисков рудных месторождений. В создании этого метода большую роль сыграли работы В. З. Фурсова [46], И. И. Степанова и ряда зарубежных авторов. Тогда же были начаты исследования по применению атмохимического метода к поискам рудных месторождений по косвенным газам-индикаторам (CO_2, O_2). В дальнейшем в этой области работали Н. Н. Куликова, А. И. Фридман, С. А. Воробьев, Б. А. Досанова и другие исследователи. Успешное развитие получил метод гелиевой съемки (И. Н. Яницкий и др.).

К настоящему времени атмохимический метод поисков месторождений твердых полезных ископаемых прошел первую стадию опытных работ, и указания по производству поисковых атмохимических съемок в закрытых рудных районах вошли в действующую Инструкцию [21]. Повышенный интерес к атмохимическим методам поисков погребенных рудных месторождений проявляется и за рубежом [48]. Одновременно поисковые атмохимические съемки различной детальности в нефтегазоносных районах благодаря многолетним работам П. Л. Антонова, В. А. Соколова, Л. М. Зорькина, С. Л. Зубайраева, А. В. Петухова и многих других исследователей заняли прочное место в комплексе съемочно-поисковых работ [4, 12, 13].

Геологические и геохимические обоснования атмохимического метода поисков месторождений нефти и газа наиболее очевидны. Природная нефтяная залежь представляет собой смесь жидких и газообразных углеводородов (УВ), метанового, нафтенового и ароматического рядов с примесью сернистых, азотистых, кислородных соединений и зольных остатков. В зависимости от условий залегания она может представлять собой либо однофазовую газонасыщенную жидкость, либо распадаться на жидкую и газовую фазы, образуя в верхних горизонтах залежи так называемую «газовую шапку». В составе нефтяного газа преобладают метан (CH_4) и его тяжелые гомологи — этан, пропан, бутан с общей формулой C_nH_{2n+2}. В качестве примесей содержатся переменные количества азота, углекислоты, гелия и других газов, содержания метана обычно превышают сумму содержаний тяжелых углеводородов (ТУВ). Аналогичный состав имеют собственно газовые месторождения природного горючего газа и газы угольных месторождений.

Содержание углеводородов в нефтяных газах достигает 80—95 %, в то время как их геохимический фон в подпочвенном воздухе не превышает $2 \div 4 \cdot 10^{-4}$ %. Эта огромная разность концентраций определяет протекание процессов рассеяния углеводородов в окружающих горных породах. Любые горные породы обладают газопроницаемостью благодаря наличию в них сообщающихся между собой пор и трещин. Под действием литостатистического давления движение газов в свободных порах и трещинах происходят в сторону дневной поверхности в форме эффузии. В водонасыщенных породах распространение газа обязано диффузии и определяется градиентом его концентрации.

Простейшая схема образования атмохимического ореола рассеяния нефтегазовой залежи показана на рис. 87. На нем приведены два варианта графиков содержаний углеводородов в подпочвенной атмосфере: с одним максимумом над залежью, так называемая «прямая аномалия», и с двумя максимумами, разделенными околофоновыми содержаниями в эпицентре месторождения. Во втором случае в плане обнаруживаются «кольцевые аномалии», весьма часто встречающиеся в практике. Такая форма газовых аномалий объясняется повышенной трещиноватостью пород вблизи периклинали и более слабой в сводовой части структуры. Аналогичный характер имеют газовые ореолы месторождений гелия, залежей углекис-

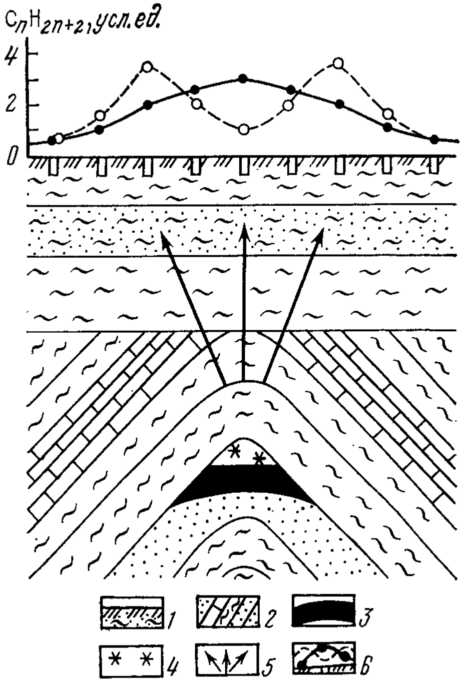


Рис. 87. Схема атмохимического ореола рассеяния газонефтяной залежи.

1 — перекрывающие отложения; *2* — продуктивная толща; *3* — нефть; *4* — «газовая шапка»; *5* — направление эффузии и диффузии газов; *6* — газосъемочные скважины и графики содержаний углеводородов (два варианта)

лоты, сернистого газа и других природных газовых скоплений, обособляющихся в литосфере. Содержание гелия в его месторождениях может достигать 6—8 % при кларке атмосферы $5{,}2 \cdot 10^{-4}$ % He, в залежах углекислого газа его содержание достигает 99 % при кларке атмосферы $3 \cdot 10^{-2}$ % CO_2, содержание водорода в газовых выделениях может составлять 50 % при фоновых концентрациях в почвенном воздухе $2{,}1 \times \times 10^{-4}$ % H_2 и т. п. Поэтому атмохимические съемки являются прямым методом поисков нефтяных и газовых месторождений.

Газортутные съемки — косвенный метод поисков месторождений полезных ископаемых, и только применительно к собственно ртутным месторождениям они приобретают значение прямого метода. Тесное геохимическое сродство ртути с серой определяет ее принадлежность к числу халькофильных элементов (Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg, In, Tl, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi, S, Se, Te). В сульфидных минералах и месторождениях этой группы элементов обнаруживаются существенно повышенные содержания ртути. Так, содержание ртути в церуссите — продукте окисления галенита — может достигать 0,1 %, что в десятки тысяч раз превышает кларк литосферы. Способность к накоплению ртути отмечается и для месторождений других полезных ископаемых, в том числе нефти и газа. Другими замечательными свойствами ртути являются ее высокая летучесть и способность к восстановлению в гипергенных условиях до самородного состояния с переходом путем прямой возгонки из ее природных соединений в состояние атомарного газа.

Все это наряду с очень низким ($1{,}33 \cdot 10^{-9}$ мг/л) и устойчивым ($\varepsilon = 1{,}02$) геохимическим фоном ртути в атмосфере обеспечивает газортутным съемкам роль одного из важнейших и, в известной мере, универсального метода геохимических поисков полезных ископаемых на закрытых территориях. Пример результатов газортутной съемки над погребенным золоторудным месторождением показан на рис. 88. Здесь при мощности лёссовидных суглинков 40 м в почвенном воздухе зафиксирована аномалия, в то время как в литохимических пробах содержания ртути остались фоновыми [46].

Действительные возможности этого метода поисков раскрыты далеко не полностью. Более подробного обоснования требуют принципы атмохимических поисков рудных месторождений по комплексу сопутствующих газов.

Многочисленные данные подтверждают наличие вокруг рудных залежей своеобразной газовой атмосферы, сопровождающей месторождения в течение всего периода их существования. Систематические сведения о составе этих газов имеются в работах А. И. Кравцова, А. И. Фридмана [45], обширные данные по этому вопросу собрал С. А. Воробьев. Среди газов рудных месторождений выделяются три основные группы: 1) газы, сингенетичные процессу рудообразования; 2) газовые компоненты зон тектонических нарушений; 3) газы гипергенных процессов.

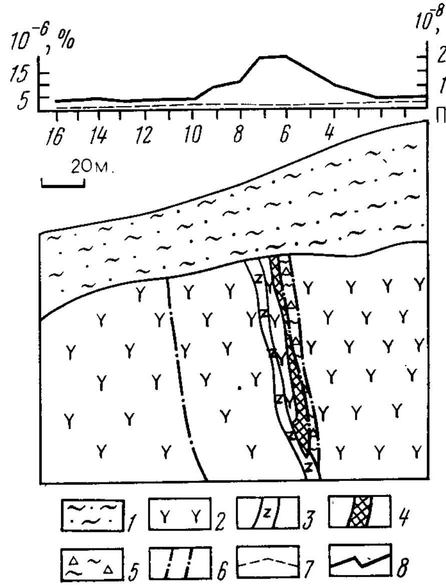


Рис. 88. Сравнительные результаты газортутной и литохимической съемок над погребенным золоторудным месторождением. Узбекистан [46].

1 — лёссовые суглннки; *2* — андезито-дацитовые порфириты; *3* — дайки диабазовых порфиритов; *4* — кварц-сульфидные золоторудные тела (блеклые руды, пирит, халькопирит); *5* — глииа и брекчия; *6* — тектонические нарушеиия; *7* — содержания ртути в рыхлых отложеииях (в %); *8* — пары ртути

Газы — компоненты процесса рудообразования содержатся в виде включений в рудных и жильных минералах, слагающих рудные залежи. Для обширной группы гидротермальных месторождений это углекислый газ, сероводород, сернистый газ, метан, водород, летучие соединения галогенов и другие газы, наличие которых в рудных телах доказано многочисленными исследованиями газово-жидких включений в минералах. Наиболее распространенный компонент рудообразующей среды — углекислый газ, значительные содержания которого отмечаются в подавляющем большинстве газово-жидких включений. Углекислый газ и водород, заключенные в рудных минералах, являются продуктами химических реакций, протекающих в магме [45], их образование происходит в результате взаимодействия углерода с парами воды: $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$. Предполагается, что образование водорода происходит также при взаимодействии водяного пара с оксидами железа: $3FeO + H_2O = Fe_3O_4 + H_2$. Повышенные содержания водорода характерны для высокотемпературных гидротермальных месторождений.

Образование метана в глубинных частях Земли может протекать при взаимодействии диоксида углерода с молекулярным водородом в соответствующих физико-химических условиях ($T = 600$ °C, $P = 104$ кПа). В присутствии катализаторов реакция может идти при температуре 475 °C:

$$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O.$$

Возможны и другие схемы реакций:

$$C + 2H_2 = CH_4;$$

$$CO + 6H_2 = CH_4 + H_2O.$$

Приведенные реакции описывают образование углекислого газа, водорода и метана в магматических и гидротермальных процессах. Большие количества этих компонентов генерируются

при термометаморфизме органического вещества, рассеянного в рудовмещающих породах. Высвобождение гипогенных газовых компонентов, законсервированных в рудном веществе и в рудовмещающих породах, происходит непрерывно по мере вскрытия (декрепитации) газово-жидких включений при выветривании, динамометаморфизме и прочих внешних воздействиях.

Вторую группу составляют газы глубинного происхождения, мигрирующие по рудоконтролирующим тектоническим зонам, в которых локализуются рудные тела. Эти газы (CO_2, CH_4, He, H_2) являются продуктами магматических процессов, а также химических и ядерных реакций, протекающих в земных недрах. По происхождению они близки к газам первой группы и в случае локализации рудных тел в зонах разломов составляют с ними единое целое. Характерный пример подобной взаимосвязи — газовыделения на золоторудном месторождении Балей. Здесь, по данным Н. Н. Куликовой, наблюдались спонтанные выходы газа, почти нацело состоящего из CO_2. Высокое содержание CO_2, CH_4 и других газов в воздухе многих рудников свидетельствует о постоянно протекающей разгрузке больших количеств природного газа в подземную атмосферу.

Интенсивные выделения газа, состоящего из CH_4 (99 %) и CO_2 (1 %), имели место при разработке медно-никелевых месторождений Норильского района. Длительное газирование (6—7 лет) отдельных разведочных скважин имело место на Урупском медноколчеданном месторождении. Газовый поток с высокими содержаниями углекислого газа, метана, гелия и сероводорода в течение всего периода газовыделения практически не изменил своего состава [45]. А. Г. Бетехтин в известной монографии «Минералогия» сообщает об обильном выделении H_2S совместно с CO_2 и AsH_3 при разработке аурипигментных руд Джульфинского месторождения. На Надеждинском золоторудном месторождении отмечалось истечение газа, состоящего (в %) из CO_2 — 67,9; CH_4 — 8,6.

К третьей группе относятся газовые компоненты (CO_2, O_2, H_2 и др.), образующиеся в результате процессов, протекающих в зоне гипергенеза рудных месторождений. Наиболее активно физико-химические преобразования рудных минералов протекают в зоне окисления сульфидных месторождений (см. разд. 3.4). Образующиеся при этом свободная серная кислота и кислые сульфаты металлов при наличии карбонатов или карбонатных вод вступают в реакции с выделением свободного углекислого газа.

Взаимодействие серной кислоты с рядом сульфидных минералов (пирит, галенит, сфалерит и др.) при низком парциальном давлении кислорода приводит к образованию сероводорода по формальной схеме $MeS + H_2SO_4 \rightarrow MeSO_4 + H_2S$.

Образование сернистого газа происходит при взаимодействии мелантерита с пиритом при наличии свободного кислорода [40].

Реакция окисления сульфидов требует больших затрат свободного кислорода. Подсчет В. С. и С. С. Глебовских показывает, что при полном окислении до $Fe(OH)_3$ и H_2SO_4 на глубину 1 мм пиритового тела площадью 1 $м^2$ связывается до 3,5 $м^3$ свободного кислорода. Столь большое потребление кислорода приводит к заметному понижению его содержаний в подпочвенном воздухе над окисляющимися сульфидными месторождениями.

Газы всех трех групп в сумме определяют формирование многокомпонентных атмохимических ореолов рассеяния рудных месторождений; полевые наблюдения подтверждают реальность их выявления. На рис. 89 показаны результаты атмохимической съемки по профилю, пересекающему зону пиритизации, над которой в почвенном воздухе фиксируется аномально повышенные содержания CO_2 и пониженные O_2. Эти первые данные имели методическое значение. В практике атмохимические поиски целесообразны только в закрытых районах; примеры таких работ приведены в главе 6.

Убедительные результаты атмохимических съемок были получены А. И. Фридманом (рис. 90). По профилю Боргустан — Ессентуки при съемках с шагом 100 м и глубине газоотбора 1,5 м были выявлены аномальные содержания CO_2 до 4,5 % при местном фоне 0,33 % CO_2. Заданная по этим данным на одной из аномалий буровая скважина вскрыла на глубине 600 м залежь углекислого газа под давлением порядка 60 кПа. Газовые аномалии CO_2, CH_4, H_2, He при атмохимических съемках были встречены в связи с различными полезными ископаемыми, и реальность их существования не вызывает сомнений.

Выборочные данные по результатам атмохимических исследований приведены в табл. 19.

Теория формирования газовых ореолов рассеяния основана на рассмотрении дифференциальных уравнений диффузии в го-

Таблица 19

Характеристика газов-индикаторов

Полезное ископаемое	Газ	Геохимический фон		C_{max}*, %	Показатель контрастности γ
		$C_ф$, %	$\varepsilon^{\pm1}$		
Рудные месторождения и кимберлиты	CO_2	0,3	1,5	3,0	5,68
	CH_4	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1,5	0,01	10,7
	H_2	$2,1 \cdot 10^{-4}$	2,0	0,01	5,57
	O_2	20,6±0,21	—	15,0	26,7
Минеральные воды	CO_2	0,33	2,38	4,5	3,01
	O_2	20,4	1,01	17,3	16,5
Нефть и газ	CH_4	0,25**	2,1	1,57**	2,5
	ТУВ	0,01**	1,6	0,14**	5,6

* Для O_2 дано C_{min}.
** Выражено в $см^3$/кг.

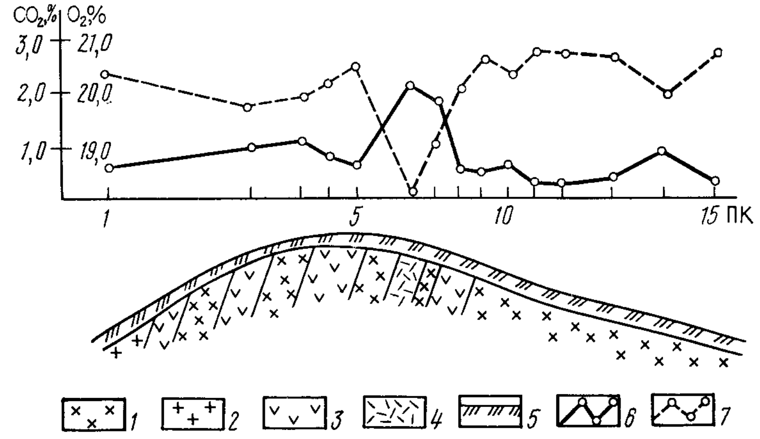


Рис. 89. Газовый ореол над зоной пиритизации. *По В. С. и С. С. Глебовским.*

1 — гнейсы; 2 — граниты; 3 — кварцевые порфиры; 4 — зона пиритизации; 5 — рыхлые образования; 6, 7 — графики содержаний CO_2 (6), O_2 (7). Глубина пробоотбора 1,5 м

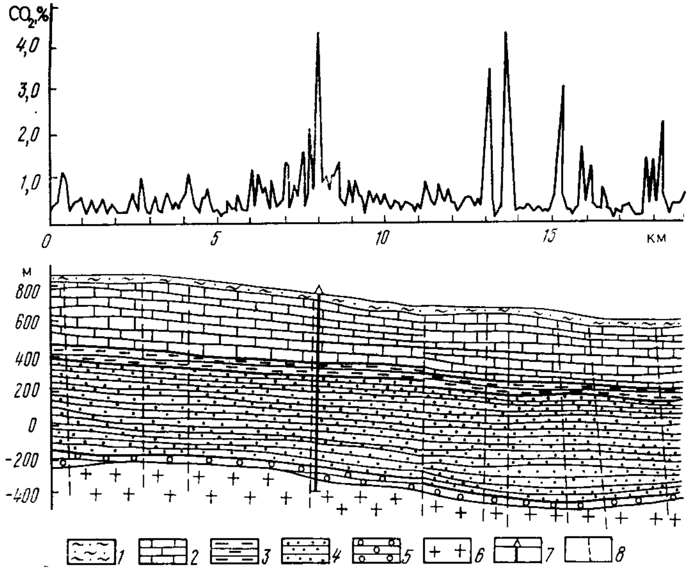


Рис. 90. График содержаний CO_2 и геологический разрез по профилю Боргустан — Ессентуки. *По А. И. Фридману.*

1 — четвертичные суглинки, глины; отложения мелового возраста; 2 — известняки; 3 — аргиллиты; 4 — песчаники; 5 — юрские конгломераты; 6 — граниты; 7 — скважина; 8 — разломы, установленные по данным атмохимической съемки

ризонтально-слоистой среде. С методической стороны наибольший интерес представляет ориентировочная оценка расстояния H_0, на котором содержание газа в подземной атмосфере составит определенную долю от содержания этого газа в залежи полезного ископаемого (C_p), если диффузионный процесс протекает в течение времени T в среде с коэффициентом диффузии D. Решение этой задачи, известное из курсов теоретической физики, для бесконечно длинного линейного источника в изотропной среде определяется выражением

$$C_z = \frac{C_p}{Ei\left[-\frac{H_0^2}{4DT}\right]} Ei\left[-\frac{(H_0+z)^2}{4DT}\right], \qquad (108)$$

где C_z — концентрация газа по оси ореола на глубине z; E — интегральная показательная функция от выражения, стоящего в скобках. Значения этой функции табулированы в математических справочниках. Исходя из близких значений коэффициентов диффузии для CO_2 и CH_4, оцениваемых величиной $D = (1-5) \times 10^{-6}$ см²/с, С. А. Воробьев рассчитал по формуле (108) ожидаемые результаты диффузии за время, отвечающее геологическому возрасту ближайших стратиграфических подразделений осадочного чехла (табл. 20). Содержания CO_2 и CH_4 в рудничных выделениях могут достигать 0,5—5 % [45], а в газовых залежах приближаются к 100 %, поэтому полученные данные подтверждают возможность обнаружения газовых аномалий над погребенными месторождениями при мощности перекрывающих отложений от десятков до тысяч метров. Такой интервал глубин отвечает задачам нефтепоисковых работ и полностью перекрывает глубину, до которой в современный период ведутся поиски погребенных рудных месторождений (до 500 м). При большой мощности чехла возраст отложений, как правило, больше.

Сходные результаты дают расчеты по формуле для залежей, изометрической формы, в плане отвечающей нефтяным и газовым месторождениям или рудным штокверкам. Близкие

Таблица 20

Мощность перекрывающих отложений H_0 (в м), при которой на поверхности чехла ожидаются аномалии CO_2 и CH_4 (линейный источник). По С. А. Воробьеву

Отложения	Возраст, млн. лет	C_{max} в долях C_p			
		0,001	0,01	0,005	0,2
Голоценовые	0,01	55	43	33	23
Четвертичные	0,7	403	290	196	103
	1,7	618	430	290	140
Неогеновые	25	2280	1570	970	400
Палеогеновые	67	3680	2510	1520	580
Меловые	137	5200	3540	2120	780

1/28 Заказ № 405

данные были получены П. А. Антоновым. В природной обстановке формирование диффузионных газовых ореолов осложняется неоднородностями литологического состава чехла, наличием водоносных горизонтов и тектонических нарушений. За последнее время высказываются мнения о формировании газовых ореолов рассеяния преимущественно за счет эффузии газов по трещинам, при подчиненной роли диффузии. В пользу этой точки зрения говорит наличие «кольцевых» аномалий над нефтяными структурами (см. рис. 87). Однако преодоление газовым потоком водоносных горизонтов происходит в результате диффузии.

Развитие атмохимического метода поисков полезных ископаемых протекало сложным путем, и трудности его внедрения еще не преодолены. Две основные операции — полевой пробоотбор и экспресс-анализ проб создают серьезные методические проблемы при атмохимических съемках.

Газовый пробоотбор при атмохимических съемках проводится из скважин с глубины ниже горизонта активного газообмена почвенного воздуха с атмосферой. Специальные исследования определяют положение этого горизонта на глубине — 1,5 м, практически при поисках рудных месторождений пробы отбираются с глубины 3,0 м, при поисках нефти и газа — с глубины 20—25 м, иногда более 200 м. При нефтепоисковых работах съемки ведутся путем отбора керна с его герметизацией и последующей дегазацией в лаборатории для анализа содержащихся в нем газов.

При поисках рудных месторождений чаще отбираются пробы свободного подпочвенного воздуха в специальные ампулы (250 мл, рис. 91). Это вызывает необходимость изоляции забоя скважин от атмосферы и удаления из призабойной камеры первых порций воздуха, не отражающих состава подпочвенных газов. Объем откачки воздуха из скважины при заполнении ампулы не должен быть меньше пятикратного объема призабойной камеры. Не следует допускать подсос атмосферного воздуха за счет выхода на поверхность или пересечения свободного ствола скважины границей зоны эвакуации (на рис. 91 показана пунктиром). При поисках твердых полезных ископаемых в процессе газоотбора определяются содержания CO_2 с помощью шахтного интерферометра (ШИ-10). Остальные газовые компоненты и повторно CO_2 определяются в лаборатории.

Пробоотбор при газортутных съемках ведется с помощью специального зонда с золотым сорбентом. После прокачки заданного объема почвенного воздуха проводится возгонка поглощенной ртути путем нагрева сорбента электрическим током и полевой анализ ее содержаний.

В первые десятилетия с момента применения нефтепоисковой газовой съемки производство работ тормозилось сложностью и низкой точностью методов газового анализа. Только

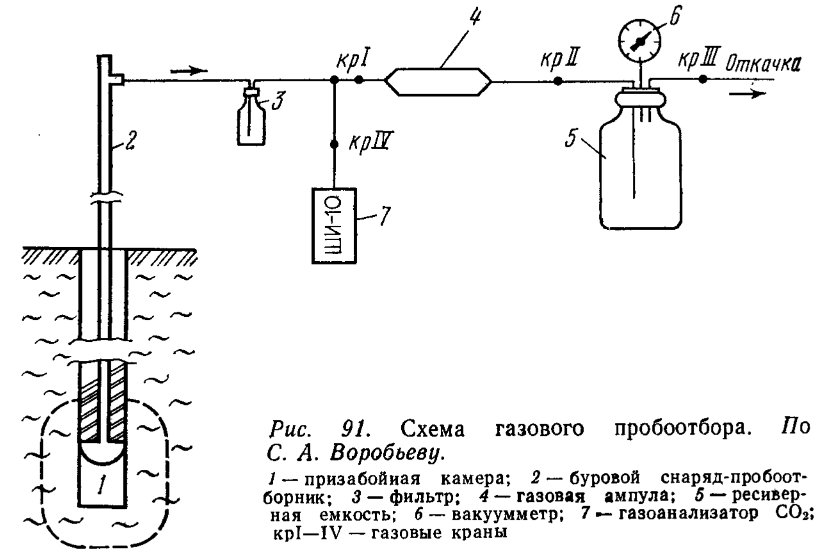


Рис. 91. Схема газового пробоотбора. *По С. А. Воробьеву.*

1 — призабойная камера; 2 — буровой снаряд-пробоотборник; 3 — фильтр; 4 — газовая ампула; 5 — ресиверная емкость; 6 — вакуумметр; 7 — газоанализатор CO_2; крI—IV — газовые краны

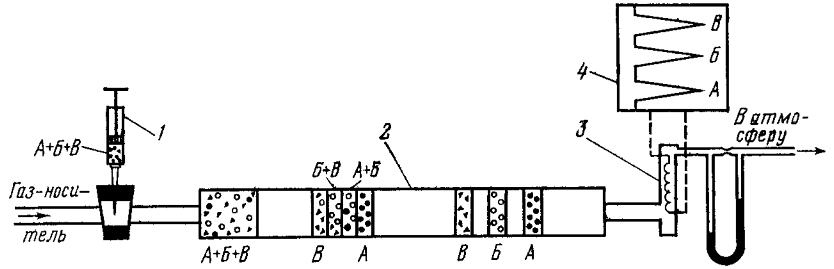


Рис. 92. Схема хроматографического анализа газов.

1 — газовый шприц-дозатор; 2 — разделительная колонка, заполненная сорбентом; 3 — детектор; 4 — самопишущий регистратор. *А, Б, В* — компоненты анализируемого газа

с появлением современных методов хроматографического анализа газов впервые открылись перспективы широкого использования атмохимических съемок при поисках разнообразных полезных ископаемых.

При хроматографическом анализе (рис. 92) поток инертного газа-носителя с постоянной скоростью пропускается через разделительную колонку, заполненную сорбентом. С помощью шприца-дозатора в поток вводится анализируемая газовая смесь в объеме 2—5 см³. Разделение пробы на составляющие ее компоненты *А, Б* и *В* происходит вследствие различий в их физико-химических свойствах и многократного повторения элементарных актов сорбции и десорбции. В результате компоненты смеси с разной скоростью передвигаются вдоль разделительной колонки и раздельно поступают к детектору. Горючие компоненты смеси определяются по теплоте сгорания или

ионизационному эффекту, негорючие — по теплопроводности или оптическим свойствам, ток в сети детектора регистрируется перопищущим потенциометром.

Дальнейшее совершенствование методики атмохимических поисков, в первую очередь месторождений нефти и газа, связано с переходом на лазерные газоанализаторы метана и других компонентов, в том числе при аэро- и автомобильных съемках с исследованием приземной атмосферы. Специальные гелиевые съемки выполняются с применением портативных магниторазрядных приборов ИНГЕМ-1. Новые перспективы открываются перед атмохимическими поисками рудных месторождений в связи с последними работами чешских геохимиков по определению в почвенном воздухе содержаний Zn, Pb, Cu и F [49].

Несомненно, что основной областью применения атмохимического метода по-прежнему останутся поиски месторождений нефти и газа. Краткому рассмотрению практики этих геохимических работ посвящен разд. 6.3. Атмохимические поиски рудных месторождений в закрытых районах имеют реальные перспективы быстро опередить по объему гидро- и биогеохимические поиски.

5.3. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых основаны на исследовании химического состава живого вещества, как правило, состава растений. Между химическим составом живых организмов и составом среды обитания существует бесспорная зависимость, в предельных случаях проявленная сменой их видового состава, усиленным или угнетенным развитием и появлением морфологических особенностей. Упоминания о связи между геологическим строением местности, наличием полезных ископаемых и составом растительности встречаются уже в средневековой литературе по горному делу. Современные биогеохимические поиски связаны с химическим анализом вещества, наблюдения над видовым составом и морфологическими особенностями растительности составляют предмет геоботанических исследований. Подобно микробиологическим съемкам, при которых в поисковых целях исследуется видовой состав почвенных бактерий, геоботанические методы к числу геохимических не относятся и здесь не рассматриваются.

В наше время интерес к биогеохимическому методу поисков проявился в середине тридцатых годов, вслед за первыми исследованиями литохимических ореолов рассеяния [34]. В СССР развитием биогеохимического метода поисков рудных месторождений занимались С. М. Ткалич, А. П. Виноградов, Д. П. Малюга, В. В. Поликарпочкин, А. Л. Ковалевский [14, 23], за рубежом — Н. Брундин и С. Палмквист (Швеция), Х. В. Уоррен и

Р. Е. Делаво (Канада), Х. Л. Кеннон (США), Р. Р. Брукс (Новая Зеландия) и другие геологи.

В результате исследований неизменно подтверждалось наличие биогеохимических аномалий в химическом составе растений, произрастающих над месторождениями меди, цинка, свинца, урана, молибдена, никеля, бора, золота и других полезных ископаемых. Обычно эти биогеохимические съемки проводились путем опробования одного или нескольких господствующих видов растений, озоления растительного вещества и спектрального анализа полученной золы.

Связь между химическими составами почвы и произрастающей на ней растительности имеет сложный характер. В составе земной биомассы общий объем животных организмов весьма незначителен, и кларки биосферы достаточно близко характеризуют средний химический состав растительности. Согласно данным табл. 1, первые 10 химических элементов в сумме образуют 99,96 % биосферы, а первые 3 макроэлемента — O, C и H слагают 98,5 % всей биомассы. На долю всех остальных 82 микроэлементов приходится всего 0,04 % живого вещества. Более 50 % массы живого вещества составляет вода, в которой связаны значительные количества кислорода и водорода. Газообразные элементы биосферы, заимствованные из атмосферы, возвращаются в нее в процессе биологического круговорота вещества.

Для характеристики геологической роли биогенной миграции микроэлементов Б. Б. Полынов предложил величину отношения между содержаниями элемента в золе растения и в почве, на которой оно произрастает. Этот показатель получил название коэффициента биологического поглощения и обозначается A_x:

$$A_x = \frac{C_2}{C_1}, \qquad (109)$$

где C_2 — содержание элемента в золе растения, %; C_1 — содержание элемента в почве, % [29].

Многочисленные сведения о содержаниях микроэлементов в растениях, животных организмах и почвах приводит В. В. Добровольский [18]. Из данных табл. 21 видно, что для рудных элементов, кроме Ti, Be, Sb, коэффициенты A_x больше 1,0, что указывает на их способность к накоплению в верхних горизонтах почв в результате минерализации ежегодного растительного опада.

В золе растений, произрастающих над рудными телами, на старых рудничных отвалах при высоких содержаниях металлов в почвах отмечались содержания рудных элементов, в десятки и в сотни раз превышающие их средний уровень. К наибольшей концентрации металлов способны определенные виды растений, в золе которых содержания отдельных металлов могут дости-

Таблица 21

Средние содержания металлов в золе растений [18]

Элемент	$C_2 \cdot 10^{-4}$ %	A_x	Элемент	C_2, 10^{-4} %	A_x
Mn	4800	6,86	Mo	12	9,23
Zn	1000	19,6	Sn	5	1,85
Ti	650	0,2	As	3	1,58
Cu	200	9,09	Be	2	0,80
Pb	50	3,73	Ag	0,6	12,5
Ni	40	1,54	Hg	0,25	7,58
Co	20	2,74	Sb	0,1	0,5

гать нескольких процентов — более 20 % Zn, до 8 % Ni, более 1 % Cu, Pb, As, Be. Однако такие растения-концентраторы не имеют повсеместного распространения, они способны накапливать металлы даже при фоновых содержаниях в почве и, как правило, мало пригодны для проведения биогеохимических поисков. Наилучших результатов поисковых биогеохимических съемок следует ожидать при опробовании таких видов растений, зола которых в области биогеохимического фона характеризуется устойчиво низкими, но определимыми содержаниями элементов-индикаторов, быстро возрастающими до аномальных вблизи месторождений. Это определяет необходимость тщательной оценки параметров местного фона $C_ф$ и ε и нижнего аномального содержания рудных элементов $\left(C_{А,\,m}=C_ф\varepsilon^{3/\sqrt{m}}\right)$ в золе местных видов растений, а также выбора одного-двух из них для поискового опробования.

Зависимость между содержаниями рудных элементов в среде обитания и в золе растений определяется их видовой принадлежностью, она изменяется для различных органов растения в связи с возрастом и вегетативными фазами развития. В общем случае она имеет сложный, часто нелинейный характер, определяется свойствами элемента и в большой степени зависит от абсолютного уровня его содержаний в почве. Установлены два основных типа этих зависимостей (рис. 93). Первый тип отвечает приближенно линейному возрастанию содержаний рудного элемента в золе растения, пропорциональному увеличению его содержания в почве. Эти растения благоприятны для опробования при биогеохимических поисках месторождений данного элемента. Второй тип характеризуется пропорциональной зависимостью между содержанием металла в почве и в золе растения только при его малых содержаниях. При аномально высоких содержаниях металла в почве наступает прогрессивное снижение коэффициента биологического поглощения, вплоть до отрицательной корреляции между C_1 и C_2. Эта зависимость объясняется наличием у этих растений защитных физиологических барьеров, препятствующих избыточному поступлению тех

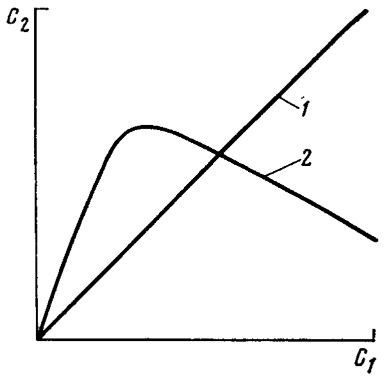


Рис. 93. Графики зависимостей содержаний рудных элементов в золе растений (C_2) от их содержаний в почве (C_1).

1 — пропорциональное биологическое поглощение; *2* — наличие биологического барьера

или иных химических элементов в организм. Растения, у которых такие барьеры обнаруживаются уже вблизи фоновых содержаний рудных элементов, непригодны для проведения биогеохимических поисков. Уровень повышенных содержаний металлов, при котором проявляется существование биохимического барьера, различен для отдельных видов и органов растений, он ниже для листьев и веток и существенно выше для коры и корней растений [23]. Перечень биообъектов различной поисковой информативности по отношению к конкретным рудным элементам приведен в Инструкции [21].

Вторым признаком, определяющим возможную эффективность биогеохимического метода поисков является глубина, на которую развивается корневая система растений. Как правило, эта глубина минимальна в районах устойчивой мерзлоты, имеет умеренную величину в условиях гумидного климата и максимальна в районах аридной зоны, изменяясь от 0,2—1,0 м в северной зоне до 20 м в южной. Для отдельных видов растений с глубокопроникающими корнями она достигает больших величин, например, у песчаной полыни 25 м, у саксаула 37 м, у верблюжьей колючки 40 м, у некоторых растений в зарубежных странах — до 70 м.

Данные биогеохимических съемок до сих пор остаются на уровне качественных результатов, что затрудняет решение основного вопроса — о преимуществах биогеохимического метода поисков, определяющих целесообразность его применения взамен других геохимических методов. Действующая Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений прямо указывает на нецелесообразность применения биогеохимических методов поисков «в горных, активно денудируемых районах любых климатических зон, а также в других районах, для которых характерны выходящие на поверхность первичные и вторичные литохимические ореолы» [21, стр. 126]. Нецелесообразны биогеохимические съемки в закрытых районах, где мощность аллохтонных отложений, перекрывающих рудоносный субстрат, заведомо превышает глубину проникновения корневой системы растений. Согласно Инструкции применение биогеохимического метода целесообразно в закрытых районах гумидной зоны с мощностью чехла 2—10 м. Однако за геологическое время обильная растительность, развивающаяся при хорошем

увлажнении, за счет минерализации ежегодного растительного опада привносит в почву огромные количества зольных остатков. Принимая, что современные климат и растительность установились с начала голоцена (10 тыс. лет назад), можно предположить, что между содержаниями рудных элементов в почве и в золе растений уже существует подвижное равновесие. Более того, при указанной малой мощности чехла помимо биогенной («зольной») составляющей литохимических ореолов рассеяния закономерно ожидать проявления на поверхности механической и солевой составляющих ореола за счет диффузии минеральных компонентов оруденения. Более полные данные в этих условиях способны обеспечить литохимические съемки.

Применение биогеохимического метода поисков предпочтительно в закрытых рудных районах в ландшафтах пустынь и полупустынь аридной зоны. Глубокая корневая система растений и разреженный растительный покров позволяют предположить разрыв между содержаниями рудных элементов в золе растений и в верхних горизонтах дальнеприносных отложений, опробуемых при наземных литохимических съемках. При мощности чехла до 40—50 м и фоновых содержаниях металлов в литохимических пробах возможно появление над погребенными рудными месторождениями отчетливых биогеохимических аномалий.

Пример таких результатов, показанный на рис. 94, иллюстрирует поисковые преимущества биогеохимических съемок на фланге полиметаллического месторождения Узунжал (Центральный Казахстан). Это месторождение было открыто в результате поисковых литохимических съемок по вторичному остаточному ореолу рассеяния свинца оконтуривающего выход рудного тела к современной дневной поверхности (см. разд. 6.2.2.). Преобладающая часть рудной зоны перекрыта неоген-четвертичными отложениями мощностью 40—50 м, на поверхности которых вторичный наложенный ореол рассеяния при стандартных литохимических съемках не был обнаружен. Литохимический ореол рассеяния оконтуривает только небольшую южную часть залежи, где чехол аллохтонных отложений отсутствует. Биогеохимический ореол рассеяния по изоконцентрате 0,005 % Pb оконтуривает всю залежь, при этом над погребенной северо-западной частью месторождения содержание свинца в биогеохимических пробах составило 0,07 % при фоновых содержаниях в почве около $2 \cdot 10^{-3}$ %. Площадь биогеохимической аномалии в 5—6 раз превышает общую площадь выхода рудного тела на поверхность коренных пород, максимальное содержание свинца в биогеохимическом ореоле рассеяния в открытой части литохимического ореола составило 1 % (при 1,25 % Pb в почве). В поисковых целях опробовалась полынь (Artemisia), озоление проводилось в муфеле при температуре 500—550°. Следует отметить, что специальные литохимические съемки

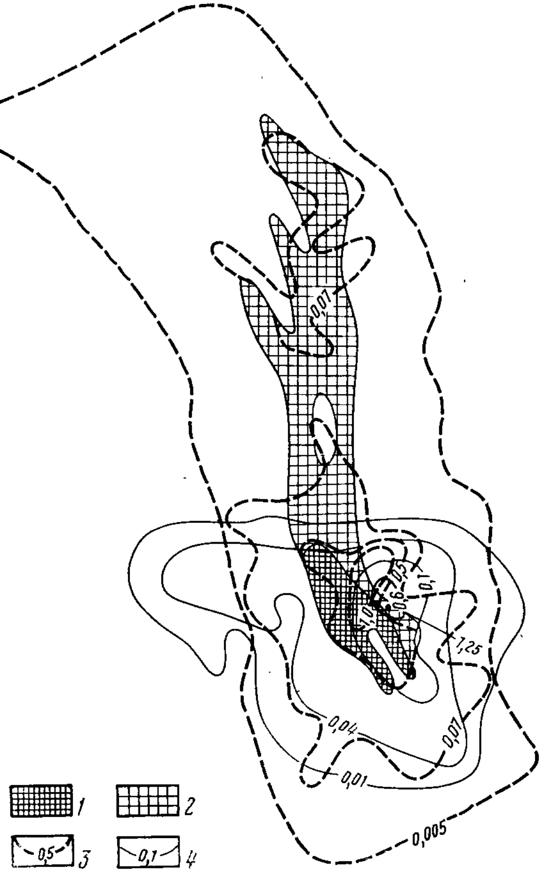


Рис. 94. Сравнительные результаты лито- и биогеохимических съемок на месторождении Узунжал. *По В. О. Гетманчуку.*

Выход рудного тела: *1* — на дневную поверхность; *2* — под чехол неоген-четвертичных отложений; изоконцентрации свинца (в %): *3* — в золе растений; *4* — в почве

с мультипликацией и сглаживанием данных для выявления наложенных ореолов рассеяния в то время не проводились.

Абсолютное большинство биогеохимических съемок проводилось различными авторами в «открытых» рудных районах при наличии остаточных литохимических ореолов рассеяния в элювио-делювии. В этих условиях нет оснований для применения биогеохимического метода поисков, несмотря на возможность обнаружения аномальных содержаний рудных элементов в золе растений. Для доказательства применимости биогеохимического метода поисков рудных месторождений часто указывают на сильную положительную корреляцию между аномальными содержаниями металлов в почве и растениях. Между тем именно этот признак говорит о нецелесообразности применения

биогеохимического метода, поскольку те же более надежно интерпретируемые поисковые данные с меньшими затратами могут быть получены литохимическим методом.

Таким образом, следует считать, что основным критерием эффективности биогеохимических поисков является отсутствие статистически значимой корреляции между аномальными содержаниями металлов в растениях и в пробах наземной литохимической съемки над погребенными рудными месторождениями. Такие условия могут возникать в закрытых рудных районах, в частности, в ландшафтах аридной зоны, на заболоченных территориях, при наличии моренно-ледниковых отложений и в других особых случаях. Область этих условий, предельные мощности перекрывающих аллохтонных отложений и виды растительности, пригодные для ведения биогеохимических поисков, исследованы еще недостаточно.

За последние годы биогеохимический метод поисков получил применение в рудных районах Бурятской АССР. Здесь, по данным Э. Ф. Жбанова, до 10 % территории закрыто эоловыми отложениями мощностью от 2 до 50 м, в связи с чем остаточные литохимические ореолы рассеяния рудных месторождений переходят в погребенное состояние, а обнаружение наложенных литохимических ореолов не гарантировано. По ландшафтным условиям район относится к горно-таежной зоне.

Поисковые биогеохимические съемки в Бурятии проводились в масштабе 1:50 000 по сети 500×50 м, частично 200×20 м; опробовались кора и шишки сосны; спектральный анализ растительных проб выполнялся после их озоления. В результате проверки одной из биогеохимических аномалий при содержаниях Mo в золе 0,01 % было выявлено месторождение молибденовых руд, названное Жарчихинским. При литохимических съемках это месторождение отметилось только незначительной аномалией, которая легко могла быть пропущена. Открытие Жарчихинского месторождения, принадлежащего к типу штокверковых, является первым практическим результатом за все время применения биогеохимического метода поисков в СССР. В двух недавних публикациях В. Г. Орлов аргументированно оспаривает роль биогеохимического метода и в открытии Жарчихинского месторождения.

Пробоотбор при биогеохимических поисках должен быть стандартизирован по признакам постоянства вида, органа и фенологической фазы опробуемых растений. Биообъекты для опробования выбирают из числа наиболее распространенных видов, с глубокой корневой системой и «безбарьерных» к содержаниям рудных элементов в корнеобитаемом слое [21, 23]. При вынужденной смене видовой принадлежности растений, большом разрыве во времени и в других случаях, когда нарушаются стандартные условия съемок, необходим перекрывающий двукратный пробоотбор в объеме не менее 30—50 точек. Полученные по этим данным переходные коэффициенты служат для приведения съемок к одному уровню. Масса воздушно-сухих проб растительности обычно устанавливается 30—40 г, что обеспечивает выполнение спектрального анализа после их озоления. Ядерно-физические методы могут применяться для анализа биогеохимических проб без озоления, хотя опыт в этой области еще недостаточен.

Попытки ведения биогеохимических поисков путем исследования содержаний рудных элементов в печени форели (Х. В. Уоррен и др., Канада), подобно более ранним исследованиям печени жаб на Южном Урале (см. разд. 1.7), не заслуживают обсуждения.

Глава 6

ПРАКТИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

6.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Доказанная эффективность поисковых геохимических исследований различного целевого назначения позволяет ставить вопрос о повсеместном производстве многолетних государственных съемок последовательно укрупняющихся масштабов. В зависимости от геологического строения, изученности и экономической освоенности территории методики, очередность и детальность геохимических съемок будут существенно различаться.

По характеру задач, которые ставятся при поисках, выделяются три основных типа территорий:

I — горно-складчатые сооружения и древние приподнятые щиты, сложенные разновозрастными осадочными, изверженными и метаморфическими породами, претерпевшие неоднократную тектоно-магматическую активизацию, с комплексом разнообразных рудных и других твердых полезных ископаемых, преимущественно в условиях субвертикального залегания, с покровом только собственных элювио-делювиальных образований и ограниченным развитием дальнеприносных отложений («открытые территории»);

II — выравненные пространства с чехлом молодых осадков мощностью до 500 м, перекрывающих складчатый фундамент («закрытые территории»);

III — области длительного накопления разновозрастных осадочных толщ большой мощности с комплексом разнообразных первичноосадочных и эпигенетических месторождений полезных ископаемых, преимущественно в условиях субгоризонтального залегания, в том числе месторождений нефти и газа, угля, осадочных железных руд, различных россыпей, стройматериалов и др., при глубине залегания складчатого фундамента, превышающей его современную горно-промышленную доступность.

В районах I типа объектами поисков являются месторождения, залегающие в породах складчатого комплекса, в районах II типа — месторождения в породах чехла и фундамента, в районах III типа — только месторождения в породах осадочного чехла. Соответственно этому изменяются перечень полезных ископаемых и методика геохимических поисков в этих районах.

По оценкам В. И. Красникова, к районам I типа относятся 30 % территории нашей страны, II типа — 13 %, III типа — 57 %. Показанный на рис. 95 предельно упрощенный геологический разрез отвечает реальным условиям. От государственной границы с Китаем в районах Северной Киргизии через горные сооружения Тянь-Шаня и Казахский мелкосопочник, двигаясь примерно по меридиану 75°, переходим к закрытым рудным районам Северного Казахстана, а затем на обширные равнины Западно-Сибирской низменности с ее газо-нефтяными месторождениями. Сходный геологический разрез можно проследить по меридиональному профилю от Большого Кавказского хребта с выходом на Русскую равнину или по широтным профилям от Северного и Полярного Урала на восток или на запад.

Очевидно, на всей территории страны разные геологические задачи могут решаться с помощью аэрогеохимических съемок последовательно укрупняющихся масштабов. В открытых районах I типа геохимические поиски твердых полезных ископаемых проводятся по их гипергенным литохимическим потокам (горные районы) и остаточным ореолам рассеяния (вся территория), а затем — по первичным ореолам. В условиях эффективного ведения литохимических поисков только ограниченное применение имеют гидрохимический и атмохимический методы поисков, а биогеохимические поиски чаще всего нецелесообразны. В закрытых районах II типа поиски погребенных рудных месторождений в складчатом фундаменте и некоторых типов полезных ископаемых в перекрывающих отложениях, в частности инфильтрационных и россыпных месторождений, возможны при наземных съемках по их вторичным наложенным солевым и газовым ореолам рассеяния, проявленным на поверхности чехла или глубинными методами. Эти задачи решаются на основе сочетания лито-, атмо-, иногда гидрохимических и — в аридных районах — биогеохимических съемок. В районах III типа в соответствующих геологических условиях основное значение приобретают геохимические поиски месторождений нефти и газа при доминирующей роли атмохимических съемок и вспомогательной роли прочих геохимических методов.

Неизменный принцип геохимических поисков — последовательный переход от мелкомасштабных съемок больших территорий к выборочному проведению более детальных съемок и увязка этих работ со стадиями единого геологоразведочного процесса. Каждой из принятых в СССР стадий и подстадий этих работ соответствует свой масштаб съемок, в составе которых одному из геохимических методов принадлежит роль основного вида работ (табл. 22).

В нашей стране государственные геологические съемки масштаба 1:1 000 000 закончены на всей территории и в настоящее время основные работы ведутся в масштабах 1 : 200 000 и 1 : 50 000. Поэтому включение в табл. 25 съемок масштаба 1 : 1 000 000, а также малоприменяемых масштабов 1 : 500 000 и 1:100 000, смежных к основным, имеет условный характер. Все перечисленные виды геохимических съемок имеют поисковую направленность, что не исключает проведение любых

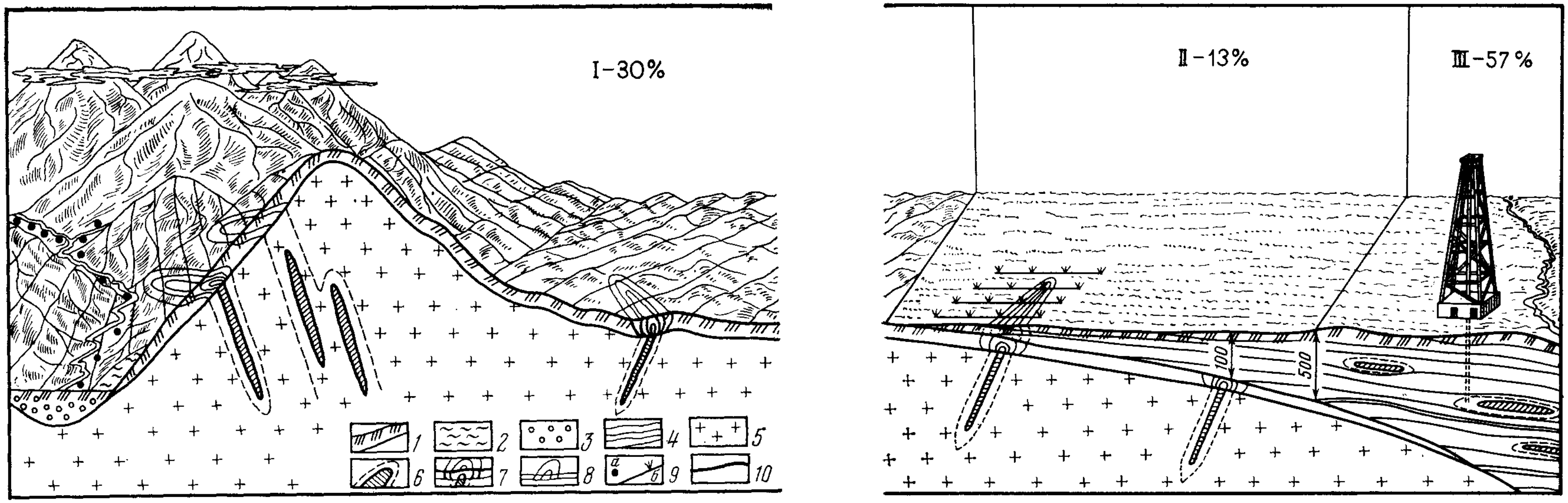


Рис. 95. Районирование территории СССР по условиям геохимических поисков.

1 — современный элювио-делювий и древняя кора выветривания; *2* — лёссовидные суглинки; *3* — аллювий; *4* — осадочный чехол; *5* — породы складчатого фундамента; *6* — рудные тела и их первичные ореолы; *7* — вторичные остаточные ореолы рассеяния; *8* — наложенные ореолы рассеяния; *9* — точки отбора литохимических *(а)* и биогеохимических *(б)* проб; *10* — профили литохимической съемки

мелкомасштабных геохимических съемок регионального характера, в частности, водногелиевой, лито-, гидро- или атмохимических съемок в порядке охраны окружающей среды, для решения металлогенических или агрохимических вопросов и с другими специальными целями.

6.2. ПОИСКИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Основы современной методики геохимических поисков месторождений твердых полезных ископаемых сложились за последние 50 лет в результате геохимических работ, проводившихся в рудных районах, главным образом с целью поисков и оценки месторождений цветных, редких металлов и золота. Общие принципы этой методики, требования к оценке выявляемых аномалий и другие условия ведения работ в рудных районах распространяются на геохимические поиски нерудных полезных ископаемых (фосфоритов, бора, асбеста, бокситов, графита, алмазов, слюды, серы, пьезооптического сырья).

На ранних стадиях работ поиски во всех случаях ведутся комплексно и на больших территориях, что заставляет заранее допускать возможность территориального совмещения месторождений различных полезных ископаемых. Более существенная зависимость методики геохимических съемок от характера

минерального сырья для любых генетических типов месторождений обнаруживается на стадиях детальных и оценочных работ.

Уточнения требует смысл термина «поисковые геохимические съемки». Поисковыми называют любые виды съемок, проводимых с целью выявления неизвестного ранее объекта поисков. Съемочные сети при поисковых работах рассчитывают по формулам (25)—(26) вероятности обнаружения объектов поисков. Как только объект поисков найден, дальнейшие геохимические съемки с более высокой плотностью наблюдений по отношению к нему уже не являются поисковыми, их задачей становятся детальное изучение и оценка объекта, на определенной стадии—обеспечение наилучшего размещения горных выработок и первых скважин. В этих условиях в контуре геохимической аномалии, фиксирующей данный объект, могут размещаться многие десятки и даже сотни точек наблюдений, число которых зависит от морфологии и условий залегания полезного ископаемого, от сложности геохимического поля, подлежащего количественной интерпретации, и опыта исполнителей. Попытки критиковать эти сети с позиций вероятности обнаружения объекта лишены оснований. Детализационно-оценочными могут быть съемки любого (не смежного!) более крупного масштаба. Одновременно съемки любой детальности, вплоть до масштаба 1:10 000 и крупнее, могут быть поисковыми по отношению

Таблица 22

Последовательность и возможные сочетания различных видов геохимических съемок

Виды съемок	1 : 1 000 000 и мельче	1 : 500 000	1 200 000	1 : 100 000	1 : 50 000	1 : 25 000	1 : 10 000	1 : 5000 и крупнее
	$n \cdot 10^6$—$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10 - n$
Твердые полезные ископаемые								
Аэрогеохимические	+	+	+	+	+	+	—	—
Литохимические:								
по потокам рассеяния	+	+	++	+	(+)	—	—	—
по вторичным ореолам рассеяния	(+)	(+)	+	+	++	+	++	(+)
по первичным ореолам	—	—	—	—	—	(+)	+	++
Гидрохимические	(+)	(+)	+	(+)	+	(+)	—	—
Атмохимические*	—	—	(+)	++	+	(+)	—	—
Биогеохимические*	—	—	(+)	(+)	(+)	—	—	—
Месторождения нефти и газа								
Аэрогеохимические	+	+	+	+	+	—	—	—
Атмохимические	—	+	++	+	++	++	—	—
Гидрохимические	(+)	(+)	+	+	+	(+)	—	—
Литохимические	—	—	+	+	+	(+)	—	—
Биогеохимические	—	—	(+)	(+)	(+)	—	—	—

Обозначения: ++ — основной вид работ; + — вспомогательный вид работ; (+) — работы ограниченного значения; прочерк — работы не проводятся.

* В закрытых районах.

к мелким и скрытым объектам, для которых вероятности обнаружения подлежат расчету по тем же формулам.

На основе обширного практического опыта сложились конкретные требования к съемочным сетям и плотности наблюдений с предпочтительными для проведения работ различными геохимическими методами (табл. 23—25).

Таблица 23

Съемки по потокам рассеяния

Масштаб	Формальные требования		Литохимические		Гидрохимические
	Сеть, км	Плотность, проб/км²	Сеть, км	Плотность, проб/км²	Средняя плотность, проб/км²
1 : 1 000 000	10×10	0,01	10×1	0,1	0,05
1 : 500 000	5×5	0,04	5×1	0,2	0,1
1 : 200 000	2×2	0,25	2×0,5	1	0,15
1 : 100 000	1×1	1	1×0,5	2	0,6
1 : 50 000	0,5×0,5	4	0,5×0,25	8	1,7
1 : 25 000	0,25×0,25	16	—	—	3,4

Таблица 24

Съемки по вторичным ореолам рассеяния

Масштаб	Литохимические (биогеохимические)		Атмохимические		Гидрохимические	
					Минимальная плотность, условия:	
	Сеть, м	Плотность, проб/км²	Сеть, м	Плотность, проб/км²	простые	сложные
1 : 1 000 000	10 000×500—200	0,2—0,5	—	—	—	—
1 : 500 000	5 000×500—200	0,4—1,0	—	—	—	—
1 : 200 000	2 000×200	2,5	2 000×100	5	0,1	0,2—0,4
1 : 100 000	1 000×200—100	5—10	1 000×100	10	0,5	1,0
1 : 50 000	500×50—100	40—20	500×100—50	20—40	1,1	1,5—2
1 : 25 000	250×40—50	100—80	250×50—100	80—40	2,3	4—5

Сопоставление стоимостей различных видов геохимических работ одинаковых масштабов без учета их результатов, лишено смысла. Достаточно очевидно, что геохимические съемки по потокам рассеяния в масштабе 1:50 000 не могут заменить более дорогие литохимические съемки того же масштаба по вторичным ореолам рассеяния, геологические результаты которых имеют существенно иной качественный характер. Не сопоставима с другими видами геохимических работ одинаковых

Таблица 25

Детальные литохимические съемки

Масштаб	По вторичным ореолам рассеяния		По первичным ореолам *	
	Сеть, м	Плотность, проб/км²	Сеть, м	Плотность, проб/км²
1 : 10 000	100×20—25	500—400	100×50—25	200—400
1 : 5 000	50×10—20	2000—1000	50×25—10	800—2000
1 : 2 000	25×10	4000		

* Съемки по первичным ореолам в масштабах 1 : 2000 и крупнее выполняются с непрерывным опробованием в зависимости от наличия горных выработок и скважин.

масштабов и стоимость атмохимических съемок, которые проводятся только в закрытых районах с мощностью чехла до 100—200 м.

Ниже рассматриваются конкретные результаты поисковых и более детальных геохимических съемок в увязке с принятой последовательностью их выполнения. Примеры решения поисковых и оценочных задач для различных геологических условий и разных видов минерального сырья служат обоснованием методики работ.

6.2.1. Поисковые съемки

На рис. 96 показан пример результатов мелкомасштабных гидрохимических съемок, выполненных в юго-восточной части Сибирской платформы [15]. Съемки проводились в двух вариантах: 1) с опробованием поверхностных вод (плотность наблюдений — 1 проба на 300 км², масштаб, близкий к 1:1 500 000); 2) с опробованием подземных вод (плотность наблюдений — 1 проба на 50 км², масштаб 1 : 700 000). Площадь исследований составила более 40 тыс. км². Район слагает горизонтально-слоистая толща карбонатных и песчано-алевролитовых пород

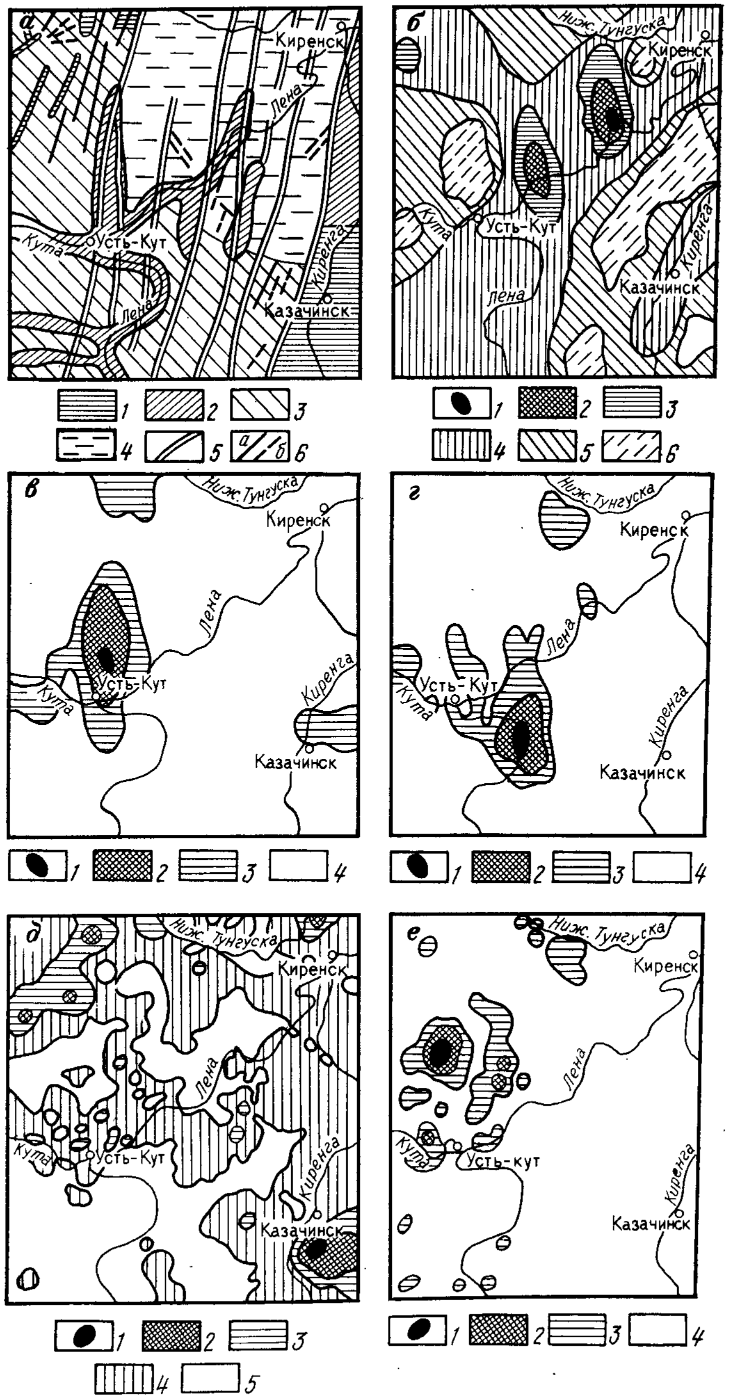


Рис. 96. Гидрохимические карты юго-восточиой части Сибирской платформы. *По И. С. Ломоносову и др.*

а — геологическая схема: *1* — карбонатные, местами соленосные отложения $Є_1—Є_2$; *2* — мергели и алевролиты с прослоями песчаников и гипса $Є_2—Є_3$; *3* — песчаники и доломиты с прослоями аргиллитов и алевролитов $O_1—O_2$; *4* — алевролиты и аргиллиты с прослоями песчаников и известняков $O_2—O_3$; *5* — оси антиклиналей; *6* — разломы установленные *(а)* и предполагаемые *(б)*.
Поверхностные воды, плотность опробования 1 точка на 300 км²: *б* — общая минерализация (в г/л): *1* — 15—24; *2* — 3,5—15; *3* — 0,8—3,5; *4* — 0,2—0,8; *5* — 0,1—0,2; *6* — менее 0,1; *в* — серебро (в мкг/л): *1* — 19—33; *2* — 3,5—19; *3* — 0,4—3,5; *4* — менее 0,4; *г* — медь (в мкг/л): *1* — 1,6—2,2; *2* — 0,6—1,6; *3* — 0,15—0,6; *4* — менее 0,15.
Подземные воды, плотность опробования 1 точка на 50 км²: *д* — серебро (в мкг/л): *1* — 8—22; *2* — 2,5—8; *3* — 0,5—2,5; *4* — 0,07—0,5; *5* — менее 0,07; *е* — медь (в мкг/л): *1* — 0,8—1,6; *2* — 0,3—0,8; *3* — 0,15—0,3; *4* — менее 0,15

кембрия — ордовика с прослоями гипса и местами соленосная. Последнее находит четкое отражение на карте общей минерализации поверхностных вод (см. рис. 96, *б*), которая изменяется от 0,1 до 24 г/л. Одновременно до аномально высоких возрастают концентрации ионов Cl^- и SO^{2-}_4, что лишний раз подтверждает возможность гидрохимических поисков залежей минеральных солей. Весьма выразительные данные были получены в результате определения в водах содержаний микроэлементов, включая фосфор и многие металлы. На рис. 96, *в* и *д* и соответственно *г* и *е* представлены карты содержаний серебра и меди для двух вариантов гидрохимической съемки. В обоих случаях выявлены отчетливые аномалии Ag и Cu, заслуживающие дальнейшего изучения. Однако гидрохимические аномалии, выявленные при разных вариантах съемки, между собой не совпадают, объяснений этому авторы не дают. Попутный отбор литохимических проб, к сожалению, не проводился. На рис. 97 показан фрагмент карты, составленной по результатам литохимической съемки масштаба 1:200 000 в горнорудном районе. На карту нанесены значения содержаний двух элементов — золота и мышьяка, хотя в практике, как правило, составляются только моноэлементные кальки, удобные для количественной интерпретации и совмещения между собой. Территория, часть которой отражена на рис. 97, характеризуется расчлененным рельефом с абсолютными высотами от 1300 до 1800 м. По ландшафтным условиям район относится к зоне тундры с устойчивой мерзлотой; в его геологическом строении принимают участие песчано-сланцевые отложения верхнего палеозоя и прорывающие их гранитоиды. Рассмотрение геохимической карты обнаруживает отчетливую горизонтальную зональность оруденения, выраженную сменой преимущественно золотоносных потоков рассеяния в западной части участка золото-мышьяковыми, в северо-восточной — мышьяковыми. Количественная интерпретация этих и смежных с ними потоков рассеяния Au и As позволила оценить ресурсы этого участка и принять решение о его дальнейшем изучении. Результаты литохимической съемки масштаба 1:50 000 по вторичным ореолам рассеяния подтвердили эту оценку.

Литохимические съемки по потокам рассеяния с плотностью наблюдений 1 проба на 1 км² (расчетная сеть 2×0,5 км) планомерно ведутся в северо-восточных районах СССР и доказали свою высокую эффективность.

Пример совмещенных результатов литохимических съемок по потокам рассеяния (шаг пробоотбора 100 м) и по вторичным ореолам рассеяния в масштабе 1:10 000 на участке Тыкжол (рис. 98) показывает полное количественное совпадение полученных данных. Результаты этих съемок послужили для оценки местных значений коэффициентов пропорциональности k' между продуктивностями ореолов и потоков рассеяния согласно зависимостям (16) и (35). Некоторые из найденных для Джунгар-

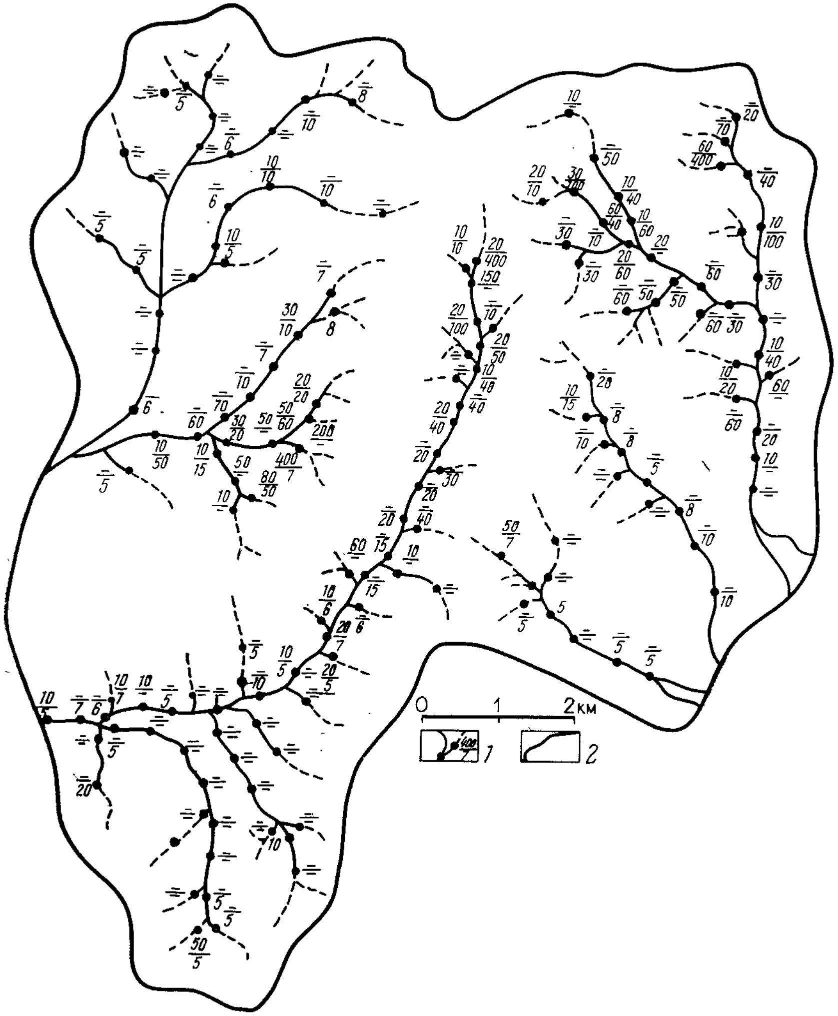


Рис. 97. Результаты литохимической съемки масштаба 1 : 200 000 в горном районе (фрагмент). *По В. А. Кононову.*

1 — точки пробоотбора: в числителе содержание Au (в 10^{-7} %), в знаменателе — As (в 10^{-3} %), прочерк для Au означает меньше 10, для As — менее 5; *2* — контур водосбора

ского Алатау средних значений k' для основных рудных элементов были приведены в табл. 11.

Важнейшим видом поисковых геохимических работ в рудных районах являются планомерные съемки масштаба 1:50 000 и смежных масштабов. В «открытых» районах они ведутся литохимическим методом, путем поисков месторождений по их вторичным остаточным ореолам рассеяния в современном элювио-делювии. В любых ландшафтных зонах эти лито-

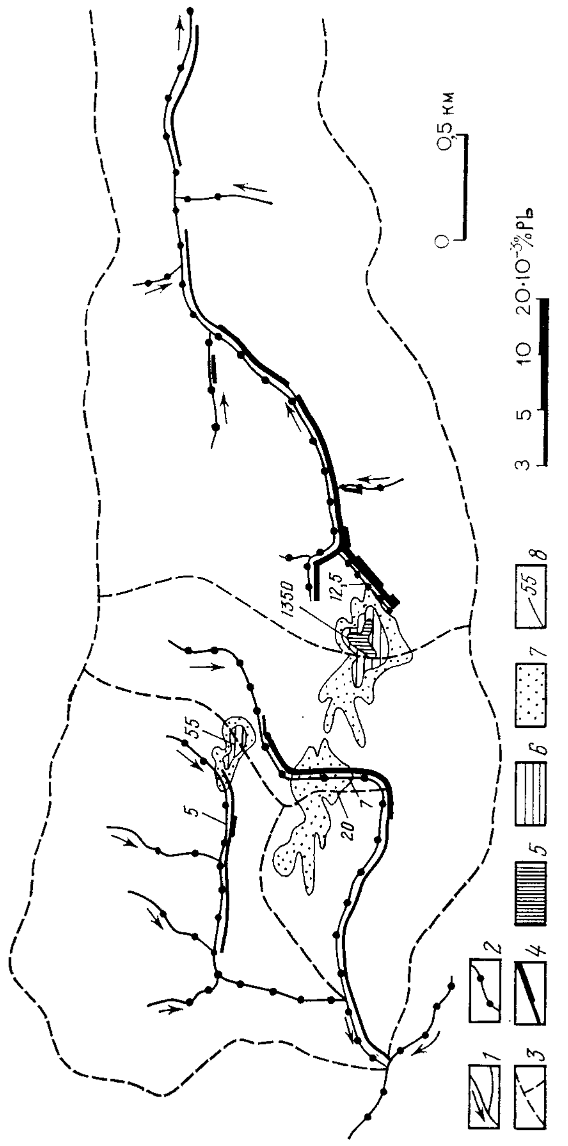


Рис. 98. Вторичные ореолы и потоки рассеяния свинца. Участок Тыкжол Джунгарский Алатау. *По С. А. Миляеву.*

1 — опробованные русла и направление стока; 2 — точки пробоотбора; 3 — водоразделы; 4 — потоки рассеяния; 5—7 — вторичные ореолы рассеяния (в %): 5 — 0,2—0,5; 6 — 0,05—0,2; 7 — 0,005—0,05; 8 — максимальные содержания свинца в ореолах и потоках рассеяния (в 10^{-3} %)

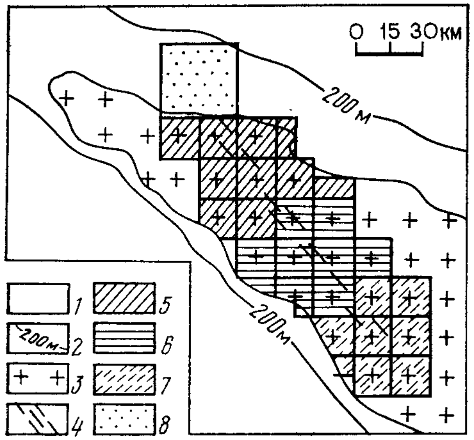


Рис. 99. Площадная схема проведения поисковых геохимических съемок в рудном районе в течение ряда лет.

1 — молодые осадки; 2 — изопахита 200 м; 3 — породы рудоносной толщи; 4 — зона оруденения; 5—7 — наземные литохимические съемки масштаба 1 : 50 000 за 1983 г. *(5)*, за 1984 г. *(6)*, проектируемые *(7)*; 8 — проектируемая атмохимическая съемка масштаба 1 : 100 000

химические («металлометрические») съемки характеризуются высокой эффективностью, и по данным именно этих съемок, начиная с 1935 г. в нашей стране открыты многие промышленные месторождения. Поиски крупных погребенных месторождений по их наложенным солевым ореолам рассеяния в закрытых районах могут продолжаться при мощности чехла до 100—120 м. В этих условиях они сочетаются с наземными атмохимическими и выборочно с глубинными литохимическими съемками масштаба 1:100 000.

Обязательное условие производства этих работ — выполнение всех видов съемок в рамках трапеций соответствующей разграфки, без произвольных пропусков и изъятий, в увязке с многолетними планами (рис. 99). Пример обнаружения литохимическими съемками масштаба 1:50 000 оловорудного месторождения в Приморье показан на рис. 100. Месторождение было пропущено при шлиховой съемке, в результате которой ранее были открыты другие оловорудные месторождения этого района. Объясняется это малым (высоким) эрозионным вскрытием данного месторождения, что отчетливо проявлено существенным преобладанием ореолов рассеяния Pb над ореолами Sn. В данном случае, как и в других оловорудных районах, свинцу принадлежит роль надрудного элемента (см. рис. 79).

Успех поисковых геохимических съемок зависит от правильной оценки выявляемых аномалий, проведение которой подчиняется серии обязательных требований. Важнейшими из них являются геологический осмотр аномалий на местности с повторно-контрольными и детализационными съемками тем же методом, которым эта аномалия была выявлена. Это требование распространяется на первичную оценку лито-, гидро-, атмо- или биогеохимических аномалий, реальность которых должна быть подтверждена теми же повторными съемками до перехода

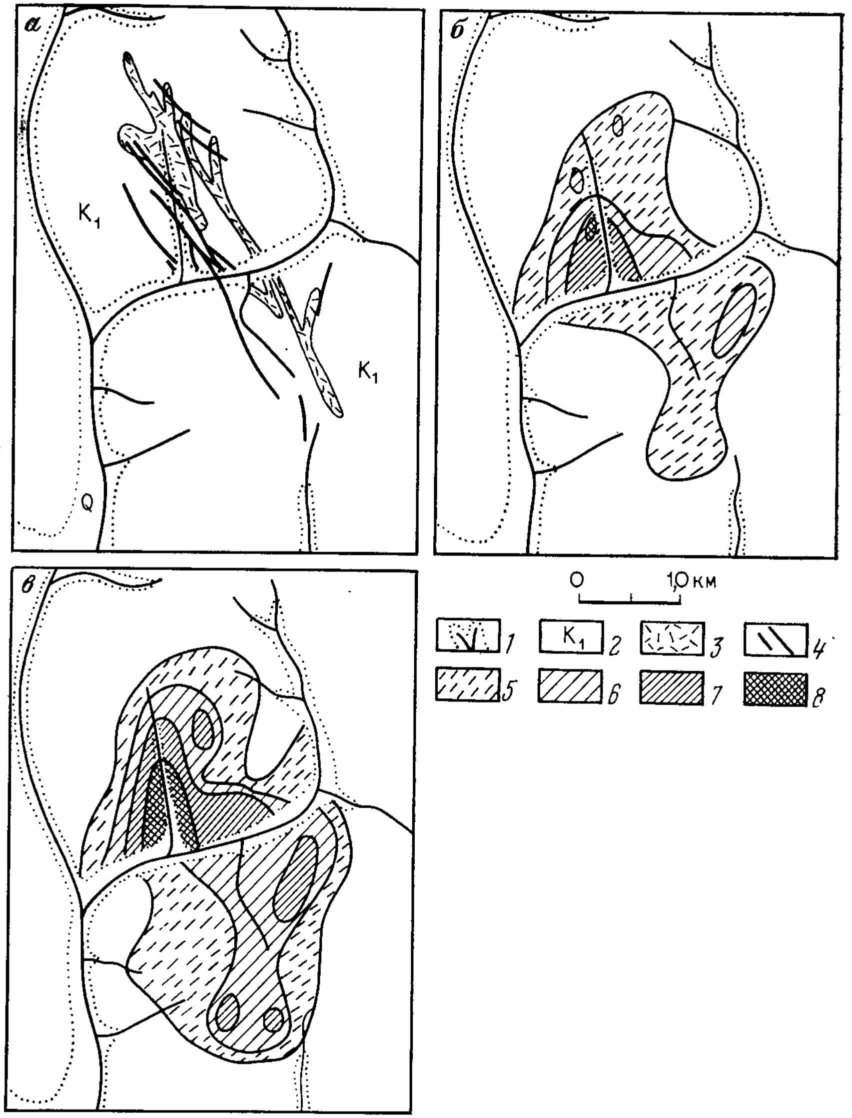


Рис. 100. Геологическая схема *(а)* и вторичные ореолы рассеяния олова *(б)* и свинца *(в)* по результатам литохимической съемки масштаба 1 : 50 000 в Приморье. *По П. А. Куршеву.*

1 — аллювиальные отложения; *2* — песчаники и алевролиты нижнего мела; *3* — дайки и субвулканические тела кварцевых порфиров; *4* — рудные жилы; *5—8* — содержания металлов в элювио-делювии (в 10^{-3} %); *5* — Sn 1—2, Pb 3—6; *6* — Sn 2—6, Pb 6—20^{-4}; *7* — Sn 6—20, Pb 20—60; *8* — Sn 20—60, Pb 60—200

к другим видам работ. Камеральное рассмотрение имеющихся данных позволяет установить очередность осмотра аномалий на местности; отбраковка аномалий без геологического осмотра считается недопустимой. Наиболее полно разработаны принципы оценки гипергенных литохимических аномалий, которые с необходимыми поправками могут применяться при работах другими методами.

Среди гипергенных аномалий, выявляемых литохимическими съемками, следует различать три основных класса. К первому классу относятся *рудные аномалии* — вторичные ореолы и потоки рассеяния коренного оруденения, ко второму — *безрудные аномалии,* среди которых целесообразно различать породные аномалии, приуроченные к горизонтам горных пород с повышенными кларками рудных элементов и гипергенные аккумуляции рудных элементов на геохимических барьерах. Третий класс образуют *техногенные* литохимические аномалии, приуроченные к отложениям культурного слоя. Природные безрудные и техногенные аномалии при поисковых работах подлежат отбраковке с обязательным указанием их литологопетрографической характеристики, типа геохимического барьера или происхождения.

В классе рудных литохимических аномалий сходные требования предъявляются к геологическому осмотру и количественной интерпретации потоков рассеяния и открытых, т. е. проявленных на современной поверхности вторичных ореолов рассеяния, основные типы которых были показаны на рис. 28. При этом наложенные ореолы и ореолы закрытого типа, включая частично погребенные, подлежат изучению глубинными литохимическими съемками с оценкой по параметрам остаточных ореолов рассеяния. В задачу оценки гипергенных рудных аномалий входит определение генетического типа и возможного промышленного масштаба связанного с ними коренного оруденения, выраженного в цифрах прогнозных ресурсов металла. В итоге принимаются решения о целесообразности и очередности более детального изучения выявленных объектов. Соответствующие оценки подтверждаются детализационным, повторно-контрольным и штуфным пробоотбором, геологическими схемами и подробными расчетами.

На объектах, оценка которых отвечает крупному или среднему месторождению, работы следующей стадии организуются в первую очередь. Объекты, предположительно отвечающие мелким месторождениям, изучаются во вторую очередь, непромышленные рудопроявления отбраковываются по результатам геологического осмотра. Полнота геологической интерпретации геохимических аномалий повышается, если полевая документация пробоотбора ведется по аэрофотоснимкам. Перед их дешифрированием на местности на снимки выносятся аномальные содержания рудных элементов. Пример такого рода иллюстрирует рис. 101. В результате литохимической съемки масш-

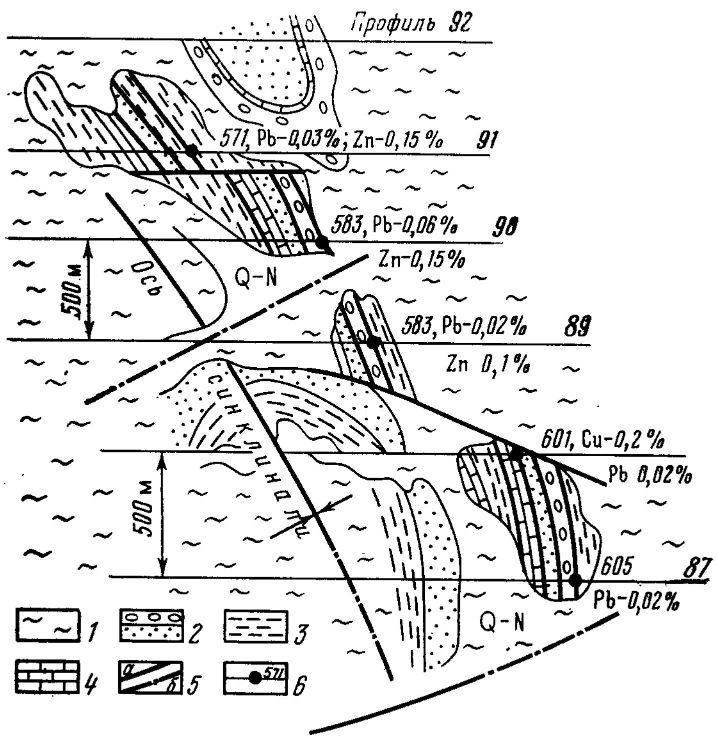


Рис. 101. Геологическая схема, составленная по результатам осмотра аномалии и дешифрирования аэрофотоснимков. *По Л. М. Филинскому.*

1 — неоген-четвертичные отложения; 2 — мелкогалечные конгломераты (кружки) и гравелиты (точки); 3 — алевролиты и алевропесчаники; 4 — известняки; 5 — тектонические нарушения (*а* — прослеженные, *б* — предполагаемые); 6 — пикеты литохимической съемки масштаба 1 : 50 000 с аномальными содержаниями металлов

таба 1:50 000, последующей детальной съемки масштаба 1:10 000, горных и буровых работ, было выявлено стратиформное полиметаллическое месторождение, по прогнозной оценке имеющее средний размер. Участок расположен в зоне сухих степей со сглаженным рельефом и слабо обнажен. Остаточные ореолы рассеяния Pb ослаблены (*k* менее 1,0).

Следует выделить основные морфологические типы вторичных ореолов рассеяния, которые выявляются при геохимических поисках в рудных районах (рис. 102). В гористой «открытой» части района поиски ведутся литохимическим методом, ореолы рассеяния типов А и Б являются остаточными. В предгорной закрытой части района с чехлом дальнеприносных («аллохтонных») отложений наземными съемками выделяются наложенные ореолы рассеяния (тип В), которые в частности могут быть литохимическими, атмохимическими, в том числе газортутными или биогеохимическими.

В геологически слабо изученных рудоперспективных районах,

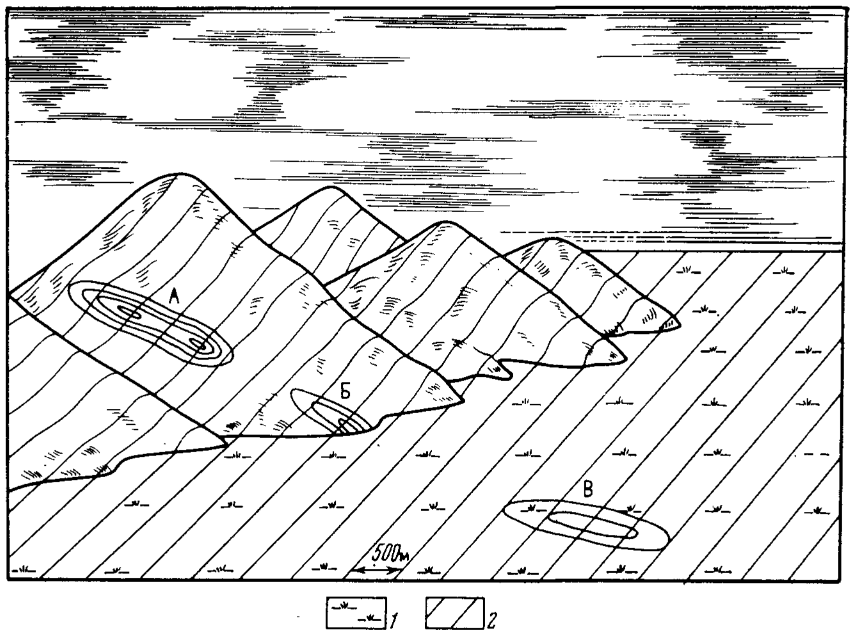


Рис. 102. Морфогенетические типы вторичных ореолов рассеяния:

А — остаточный (элювио-делювиальный), полностью открытый; Б — остаточный, частично погребенный; В — наложенный; 1 — предгорная равнина; 2 — профили литохимической съемки

в которых литохимические съемки ведутся впервые, допустимо ориентироваться на выявление обширных и богатых остаточных ореолов рассеяния типа А, и практика это подтверждает убедительными открытиями. В старых горнорудных районах, геологически и геохимически относительно хорошо изученных, трудно рассчитывать на открытие нового крупного месторождения, выходящего на поверхность на уровне промышленных руд, по его весьма яркому и протяженному остаточному ореолу рассеяния. Более вероятно обнаружение новых объектов в начальной стадии эрозионного вскрытия по их относительно бедным надрудным ореолам рассеяния (тип А) или находящимся в неблагоприятных геоморфологических условиях (тип Б). Это заставляет возвращаться к повторной оценке части ранее выявленных бедных литохимических аномалий, в свое время не привлекших внимания. В то же время следует считаться с тем, что общее число гипергенных литохимических аномалий, выявляемых в открытых рудных районах, заведомо и многократно превышает число промышленных месторождений.

Важнейшая геолого-экономическая задача — поиски погребенных месторождений на закрытых территориях. В пределах СССР к их числу относятся районы Воронежской антеклизы, где на площади 200 тыс. км² мощность осадков, перекрываю-

щих кристаллический фундамент, не превышает 200 м, более 600 тыс. км^2 территории Казахстана с той же мощностью чехла, районы Украинского кристаллического массива, районы развития Сибирских траппов и другие рудоперспективные территории, общей площадью около 3 млн. км^2.

Доказанная принципиальная возможность атмохимических поисков погребенных рудных месторождений по ореолам рассеяния комплекса попутных газов позволила в закрытых районах Казахстана начать опытно-производственные съемки масштаба 1:100 000 с целью отработки методики и техники этих съемок [19]. Результаты такой съемки на участке 500 км^2 в восточном борту Тургайского прогиба показаны на рис. 103. Складчатый фундамент этого участка слагают породы палеозоя и докембрия, чехол мощностью от 10 до 100 м слагают песчано-глинистые отложения палеоген-четвертичного возраста. Район относится к зоне сухих степей. Атмохимические съемки выполнялись по сети 1000×100 м с газоотбором из шнековых скважин глубиной 3,0 м. Одновременно на этой площади была проведена наземная литохимическая съемка масштаба 1:50 000 с глубиной пробоотбора 0,3 м, с последующим спектральным анализом, с мультипликацией и сглаживанием содержаний рудных элементов.

В результате атмохимической съемки было выявлено 14 протяженных газовых аномалий, образованных различными сочетаниями аномальных содержаний углекислого газа, метана, водорода и кислорода, часть из них совпадает с мультипликативными литохимическими ореолами (см. рис. 103). Максимальные содержания здесь составили (в %): CO_2—3,6 при фоне 0,2; CH_4—$530\cdot10^{-4}$ при фоне $1{,}5\cdot10^{-4}$; H_2—$350\cdot10^{-4}$ при фоне $2\cdot10^{-4}$; минимальное содержание O_2—18,2 при фоне 20,2. Проверка газовых аномалий глубинными литохимическими съемками (рис. 104) с последующим колонковым бурением привела к открытию двух стратиформных полиметаллических рудопроявлений, названных Алыс и Арыкбаксы, в дальнейшем была подтверждена рудная природа большинства газовых аномалий. Хотя промышленная ценность этих объектов еще неясна, полученные результаты отмечают первый случай открытия погребенного оруденения по данным атмохимической съемки.

Реальность выявления наложенных литохимических ореолов рассеяния рудных элементов над погребенными полиметаллическими месторождениями была подтверждена в Рубцовском районе Рудного Алтая. Рудовмещающие эффузивно-осадочные породы палеозоя здесь погружаются под чехол мезо- и кайнозойских отложений, мощность которых на исследованной территории достигает 100—120 м. Рудные месторождения этого района принадлежат к широко известной колчеданно-полиметаллической формации Алтайского типа, с массивными сульфидными рудами, весьма благоприятными для формирования наложенных солевых ореолов рассеяния. По ландшафтам район

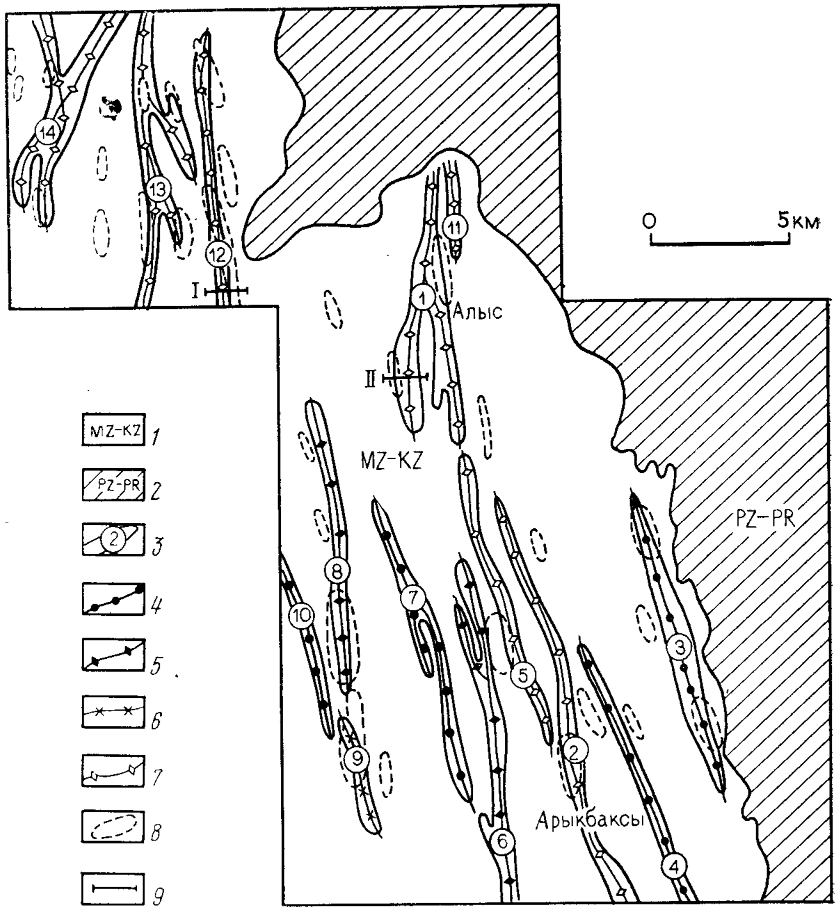


Рис. 103. Результаты атмохимической съемки масштаба 1 : 100 000. Тургайский прогиб. *По Б. А. Досановой, В. Н. Колесникову, С. А. Воробьеву.*

1 — отложения мезозоя и кайнозоя; *2* — породы палеозоя и докембрия; *3* — контуры совмещенных газовых аномалий и их номера; *4* — *7* — оси газовых аномалий: *4* — CH_4, H_2; *5* — CO_2, CH_4, H_2; *6* — CO_2, H_2; *7* — CO_2, CH_4, H_2, O_2; *8* — наложенные литохимические мультипликативные ореолы рассеяния (Pb, Ag, Hg, Co); *9* — профиль глубинной литохимической съемки

относится к зоне южных черноземных степей с умеренным увлажнением, преобладающая часть территории занята посевами сельскохозяйственных культур. Наземные литохимические съемки проводились в масштабах 1:50 000—1:25 000 с глубиной пробоотбора 20—30 см, надежных результатов по первичным данным на участках опытных работ получено не было. Для выявления наложенных ореолов рассеяния над известными месторождениями применялись методы ацетатно-буферных вытяжек с определением суммы Cu, Pb, Zn [33] и валовый спектральный анализ с мультипликацией и сглаживанием содержаний

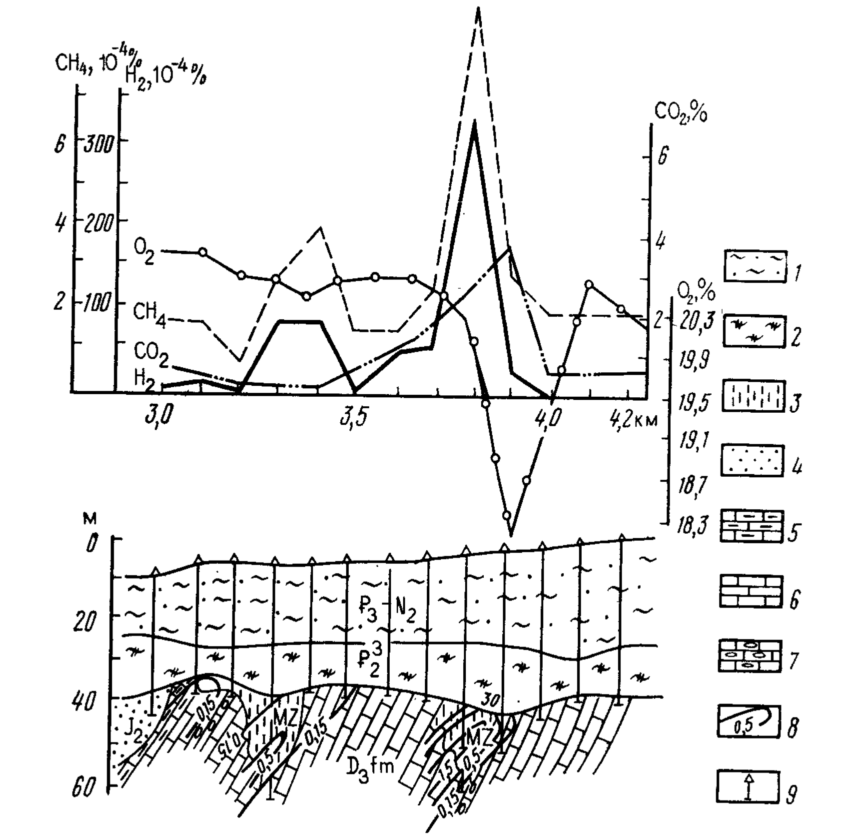


Рис. 104. Графики атмохимической съемки и геологический разрез по данным глубинной литохимической съемки на участке Алыс. (Профиль II, см. рис. 103).

1 — песчано-глинистые отложения ($₽_3$—N_2); *2* — глины ($₽_2$); *3* — кора выветривания (MZ); *4* — пески (J_2); *5* — углисто-карбонатные сланцы; *6* — известняки (D_3); *7* — окремненные известняки; *8* — изоконцентрации свинца (в %); *9* — скважины шнекового бурения

Pb, Cu, Zn, Ag, Ba на ЭВМ. Отчетливые наложенные ореолы рассеяния были обнаружены обоими методами над Таловским, Рубцовским, Крючковским погребенными полиметаллическими месторождениями. В дальнейшем поисковые съемки в этом районе были проведены вторым, более простым и экономичным методом на площади более 2000 км². В результате такой обработки первичных данных были выявлены многочисленные литохимические аномалии различного генезиса. Проверка глубинными литохимическими съемками и колонковым бурением подтвердила принадлежность большинства этих аномалий к наложенным ореолам погребенного оруденения. Одновременно выявилась группа безрудных аномалий, образованных путем гипергенной аккумуляции рудных элементов в местных ландшафтах. Для подавления безрудных аномалий был предложен эмпирический показатель $I_2 = \frac{Pb \cdot Cu \cdot Zn \cdot Ag \cdot Ba}{B \cdot Mo}$. Пример наложенных ореолов рассеяния на участке «Потеряевский», в форме распечатки, выданной ЭВМ, показан на рис. 105. Рудная природа этой ничем не проявленной на дневной поверхности аномалии доказана глубинными литохимическими съемками. По двум профилям, пройденным через аномалии, установленные содержания цинка до 0,2 %, меди до 0,15 %, свинца до 0,08 %; из 21 пробуренных здесь скважин в 17 были встречены аномальные содержания рудных элементов. Мощность чехла дальнеприносных отложений на этом участке составляет 80—90 м, необходимость продолжения работ на объекте вполне очевидна.

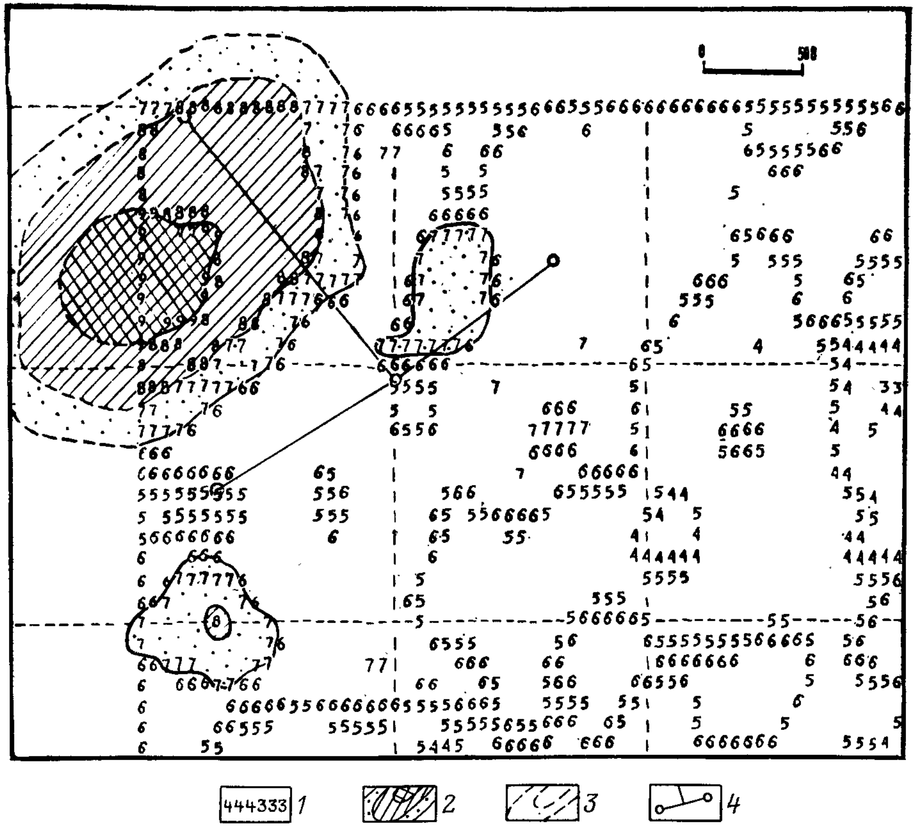


Рис. 105. Фрагмент распечатки результатов обработки на ЭВМ данных наземной литохимической съемки масштаба 1 : 25000. *Данные И. Ф. Мясникова, обработка МГУ.*

1 — значение показателя $I_2 = \frac{Pb \cdot Zn \cdot Cu \cdot Ag \cdot Ba}{Mo \cdot B}$; *2* — достоверные литохимические аномалии; *3* — контур аномалии; *4* — профили глубинной литохимической съемки, подтвердившие рудную природу аномалии

Наиболее надежным методом геохимических поисков на закрытых территориях, при наличии на поверхности фундамента древней коры выветривания, являются глубинные литохимические съемки [26]. По погребенным остаточным ореолам рассеяния возможно обнаружение месторождений любых генетических типов и масштабов оруденения независимо от мощности чехла и современных ландшафтных условий, имеющих первостепенное значение для формирования наложенных ореолов.

Основным препятствием для широкого проведения глубинных литохимических съемок является их высокая стоимость, которая возрастает с увеличением мощности дальнеприносных отложений. Поэтому в современной практике глубинные съемки ведутся в профильном варианте с целью проверки геохимических аномалий, выявленных наземными атмохимическими, литохимическими или биогеохимическими съемками на поверхности чехла. Только после подтверждения рудной природы этих аномалий на ограниченном участке выполняются глубинные литохимические съемки масштаба 1:25 000 по прямоугольной сети, с минимальным выходом за контур остаточного ореола рассеяния. Изучение погребенных ореолов рассеяния должно носить объемный характер с перебуриванием и опробованием полного профиля коры выветривания. По этим данным строятся крупномасштабные погоризонтные геохимические планы и разрезы в изоконцентрациях, подобные показанным на рис. 106 и ранее на рис. 29, 40. По параметрам погребенного остаточного ореола рассеяния проводится подсчет прогнозных ресурсов металла, на основании которого принимается решение о целесообразности и очередности бурения более глубоких разведочных скважин.

В качестве дополнительного примера возможностей геохимических поисков на закрытых территориях на рис. 107 показаны результаты опытной литохимической съемки над погребенной кимберлитовой трубкой, перекрытой траппами и терригенными отложениями. На графике мультипликативного показателя $I_x = \frac{Ca \cdot Mg \cdot S \cdot P \cdot Co \cdot Ni}{Al \cdot V \cdot Ga}$, выбранного на основе сопоставления геохимических характеристик кимберлитов, вмещающих известняков и перекрывающих отложений, обнаруживается аномалия, фиксирующая положение трубки. Числитель этого поискового геохимического показателя образует произведение содержаний элементов, находящихся в избытке в кимберлитах по сравнению с вмещающими и перекрывающими породами, знаменатель показателя— элементы, находящиеся в кимберлитах в дефиците. При формальном сходстве с показателем зональности ν поисковый показатель I_x выбирается на основе других принципов. Требование безразмерности на него не распространяется. Двугорбый характер графика (см. рис. 107), сохранившийся после сглаживания данных с окном $n=3$, не противоречит представлениям о наибольшей подвижности химических

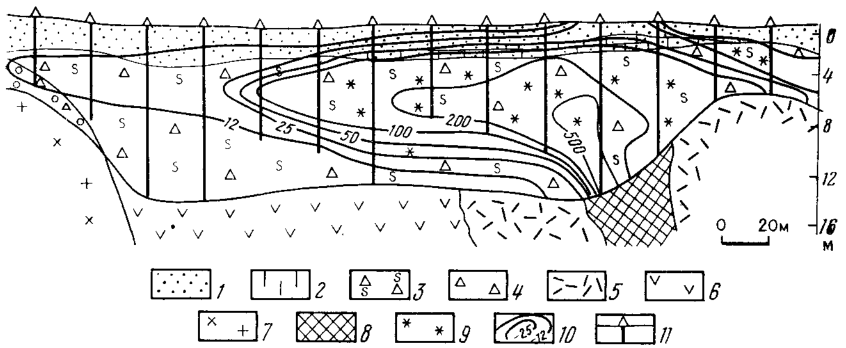


Рис. 106. Погребенные ореолы рассеяния меди по данным глубинной литохимической съемки. *По В. А. Бугрову.*

1 — дальнеприносные отложения; горизонты древней коры выветривания; *2* — обеленный глинистый; *3* — глинисто-щебенистый; *4* — щебенистый; *5* — альбитофиры; *6* — эффузивы основного состава; *7* — гранодиориты; *8* — лимониты; *9* — обохренность и ярозитизация; *10* — изоконцентраты меди (10 %); *11* — скважины шнекового бурения

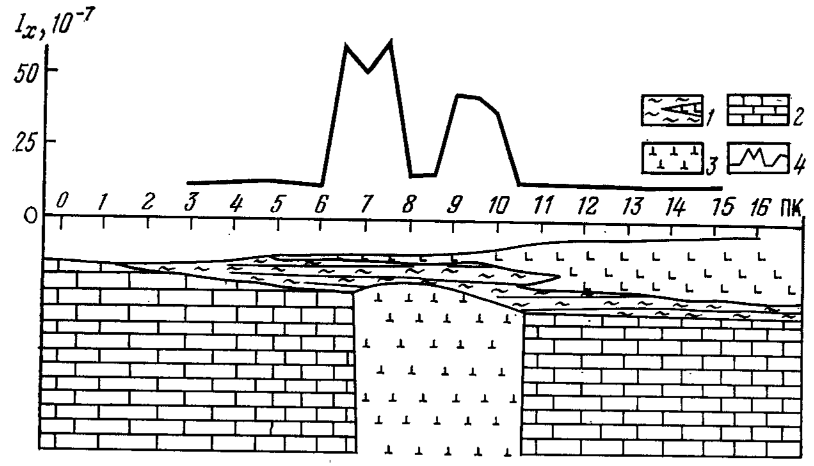


Рис. 107. Результаты наземной литохимической съемки над кимберлитовой трубкой. *По С. А. Воробьеву.*

1 — перекрывающие терригенные отложения и траппы C_{2+3}—T_1; *2* — известняки O_2—S_1; *3* — кимберлиты; *4* — график мультипликативного показателя $I_x = \frac{Ca \cdot Mg \cdot S \cdot P \cdot Co \cdot Ni}{Al \cdot V \cdot Ca}$

элементов в приконтактовой зоне трубки, об «унаследовании» перекрывающими отложениями подтрапповой тектоники и о ее отражении в гипергенном геохимическом поле.

6.2.2. Детальные и оценочные работы

Целесообразность перехода к детальным работам, как правило, определяется результатами предшествовавших поисковых геохимических съемок и геологической оценки выявленных объек-

тов. По результатам поисковых съемок подсчитываются прогнозные ресурсы категорий P_3 и P_2, выбирается методика детальных работ, размеры участка, ориентировка съемочной сети и перечень определяемых элементов. Если поисковые съемки возможны любым из геохимических методов, то детальные съемки ведутся преимущественно литохимическим методом, в наземном или глубинном вариантах, обычно совместно с геофизическими исследованиями. Для детального оконтуривания наземными съемками вторичных остаточных ореолов рассеяния полиметаллических, медных, оловорудных и большинства редкометальных месторождений и перехода к горно-буровым работам масштаб 1:10 000 обычно является достаточным. На золоторудных, бериллиевых, собственно кобальтовых, ртутных объектах и при поисках слепых рудных тел по их вторичным ореолам рассеяния съемки могут доводиться до масштаба 1:5 000, реже 1:2 000. При глубинных литохимических съемках, связанных с оконтуриванием и оценкой погребенных остаточных ореолов рассеяния, масштаб 1:25 000 обычно является завершающим. Поиски слепых тел по первичным ореолам проводятся с любой высокой детальностью, определяемой геологическими условиями и наличием доступных для опробования горных выработок и скважин.

В результате перехода от поисковых к детальным литохимическим съемкам число отдельных аномалий увеличивается, их средние геометрические размеры уменьшаются и форма их усложняется, а максимальные содержания рудных элементов возрастают. При этом общая площадная продуктивность аномалий в пределах данной площади не изменяется. Однако при малых размерах аномалий и в полузакрытых районах устойчивость оценок продуктивности нарушается.

Пример такого рода иллюстрирует открытие в Казахстане полиметаллического месторождения. Поисковыми литохимическими съемками масштаба 1:50 000 здесь были вызвлены достаточно обширные и сравнительно бедные ореолы рассеяния с максимальными содержаниями Pb 0,04—0,07 %, приуроченные к карбонатным отложениям верхнего девона. Ни один из этих ореолов особого внимания не привлек, незадолго перед этим на данной площади была проведена геологическая съемка того же масштаба, при которой это месторождение также не было выявлено.

Район характеризуется сглаженным холмистым рельефом и слабо обнажен, по ландшафтным условиям относится к зоне сухих степей с полынно-злаковой растительностью. Только в результате детальной литохимической съемки масштаба 1:10 000 здесь был выявлен локальный ореол рассеяния с содержаниями свинца в элювио-делювии 0,6 % по трем смежным профилям и $C_{мах}$=1,25 % Pb (рис. 108), приуроченный к небольшой изолированной сопке окремненных и ожелезненных известняков. Пройденные здесь канавы вскрыли церусситовые руды и уста-

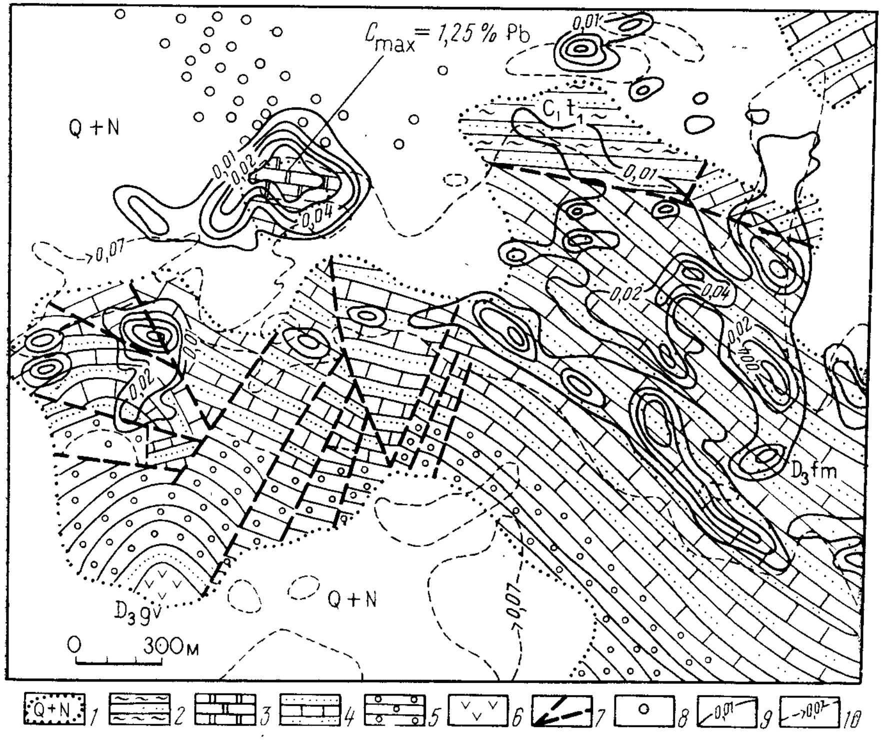


Рис. 108. Результаты детальной литохимической съемки масштаба 1 : 10 000 в районе месторождения Узунжал. *По В. А. Кличникову.*

1 — неоген-четвертичные отложения и их граница; *2* — известняки, песчаники и сланцы нижнего карбона; *3* — рудовмещающие известняки, доломиты и углистые известняки этрена; *4* — известковистые песчаники и известняки фамена; *5* — конгломераты, песчаники, туфопесчаники франа; *6* — порфириты, кварцевые профиры, песчаники живета; *7* — разрывные нарушения; *8* — скважины разведочного бурения; вторичные ореолы рассеяния (в %): *9* — свинца; *10* — цинка

новили погружение рудной залежи в северо-западном направлении под чехол неоген-четвертичных отложений. Последующие буровые работы подтвердили промышленное значение этого месторождения.

Вторичный остаточный ореол рассеяния этого месторождения — типичный представитель частично погребенных ореолов (см. рис. 102, *б*). Такие ореолы не могут характеризовать масштаб коренного оруденения без учета погребенной части рудной зоны. Мощность неоген-четвертичных отложений здесь достигает 30—40 м. Этот пример — только один из результатов поисковых и более детальных литохимических («металлометрических») съемок, широко проводившихся в Казахстане, начиная с 1949 г. Современный аридный климат, преобладание степных ландшафтов, тесное сочетание геохимических съемок с геологическими и геофизическими исследованиями обеспечили высокую эффективность этих работ [14, 25].

На стадии детальных литохимических съемок и последующих горно-буровых работ накапливаются сведения о местных коэффициентах остаточной продуктивности, больших и меньших 1, необходимые для правильной оценки выявляемых ореолов рассеяния. Для каждого из важнейших металлов, промышленные месторождения которых развиты в данном районе, найденные согласно формулам (18), (19) или (69) значения k целесообразно группировать по основным типам геохимических ландшафтов, характерных для исследуемой территории. Пример такого рода показан на рис. 109 [25]. Горные сооружения этого хребта связаны с альпийским орогенезом и характеризуются чередованием ступенчатых поднятий столового типа с глубоко расчлененными эрозией крутыми склонами. В этих условиях коэффициенты остаточной продуктивности вторичных ореолов рассеяния резко изменяются при переходе от выровненных водоразделов с абсолютными отметками порядка 2500 м и горно-луговыми почвами ($k_{Pb} \approx 0{,}07$) к активно денудируемым склонам южной экспозиции с плохо развитыми щебенистыми почвами ($k_{Pb} \approx 1{,}0$). С уменьшением абсолютной высоты местности различия между склонами южной и северной экспозиции сглаживаются. Важным является наличие в этом районе закрытых территорий — участков сохранившихся известняков неогена и современных «прислоненных» лёссов с $k=0$. Формирование таких табличных справочных данных необходимо для любых рудных районов.

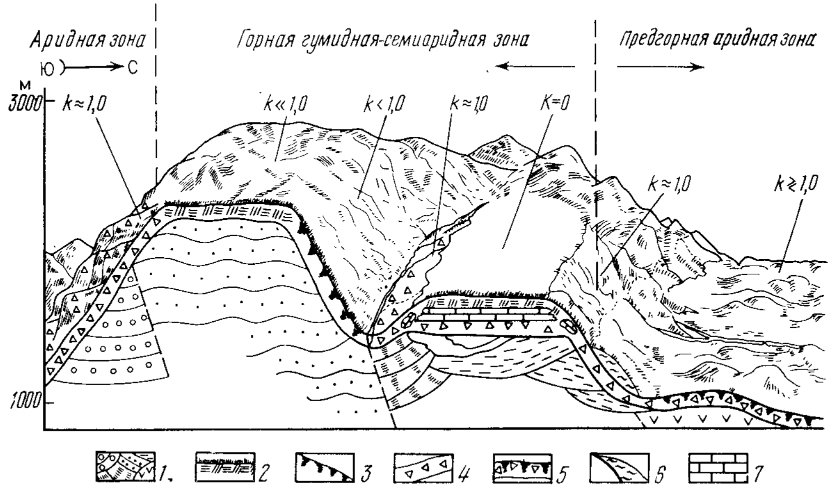


Рис. 109. Схема развития вторичных ореолов рассеяния свинца для Текелийской группы месторождений [25].

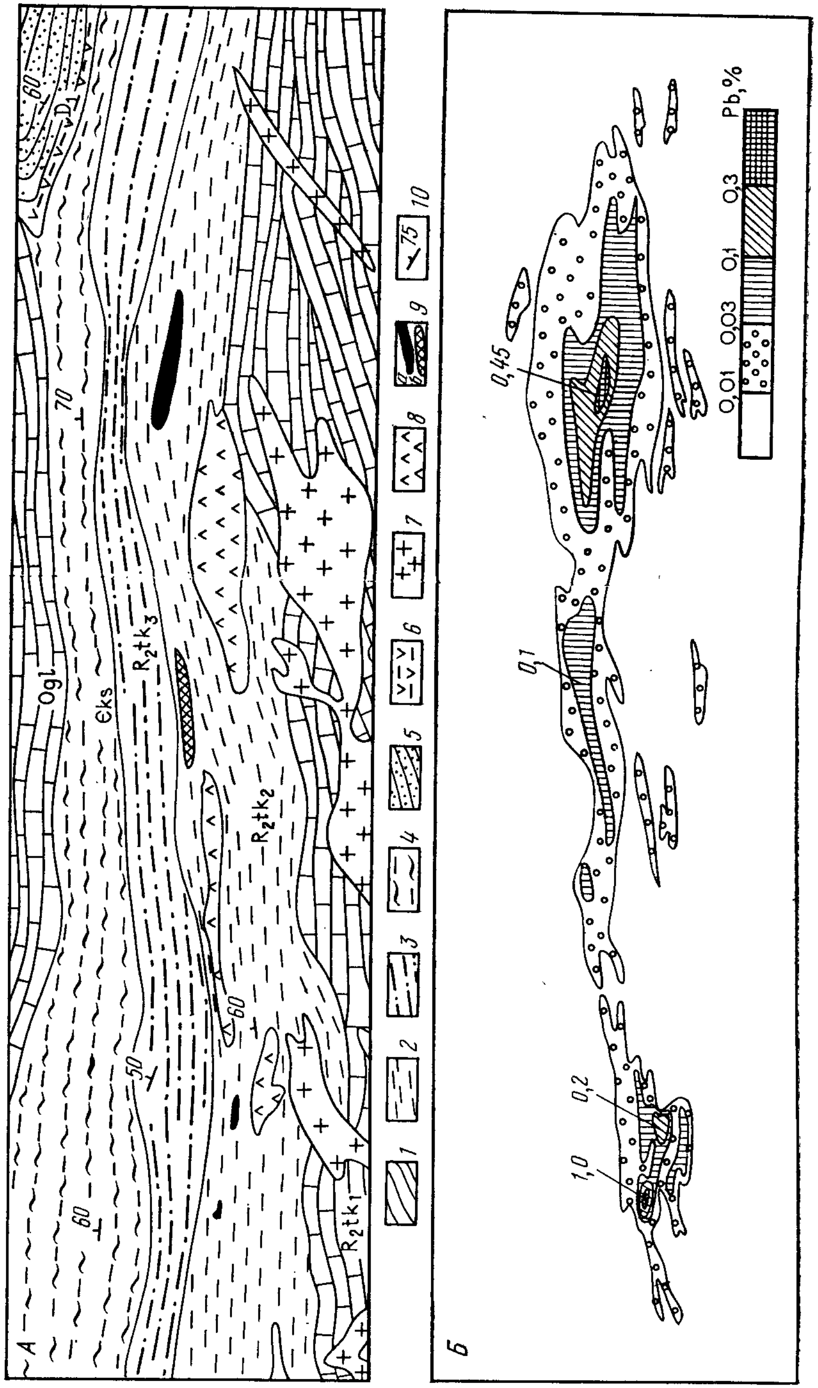
1 — рудовмещающие породы палеозоя и докембрия; *2* — элювий выровненных водоразделов с горно-луговыми почвами; *3* — элювио-делювий склонов северной экспозиции с хорошо развитыми почвами; *4* — элювио-делювий склонов южной экспозиции с грубоскелетными щебенистыми почвами; *5* — элювио-делювий предгорного мелкосопочника с плохо развитыми почвами сухих степей; *6* — «прислоненные» лёссовидные суглинки; *7* — мергелистые известняки

Весьма наглядны результаты детальной литохимической съемки масштаба 1:10 000, показанные на рис. 110. Здесь вторичные остаточные ореолы рассеяния Pb четко отражают масштаб и условия залегания рудных тел месторождения Текели (Джунгарский Алатау). Важность и многообразие геологических выводов, которые при этом может принести анализ гипергенного поля рассеяния, иллюстрирует рис. 111. Рудопроявление Левобережное, относящееся к рудному полю того же месторождения, приурочено к карбонатно-сланцевым породам текелийской свиты и локализуется в двух тектонических блоках. Масштаб полиметаллического оруденения на дневной поверхности характеризуют вторичные ореолы рассеяния свинца, дополнительную информацию несут мультипликативные ореолы рассеяния Ag·Sb (надрудная ассоциация) и Mo·Cu (подрудная ассоциация). В западном тектоническом блоке весьма слабо проявлены ореолы рассеяния Ag·Sb и достаточно четко ореолы Mo·Cu. В пределах восточного блока обнаружились яркие ореолы рассеяния Ag·Sb при полном отсутствии аномальных содержаний Mo и Cu. Наблюденные соотношения однозначно указывают на глубокий эрозионный срез западного блока и на перспективность оруденения восточного блока.

Приведенный пример показывает необходимость постоянного внимания к «геохимическим спектрам» коренного оруденения и литохимических аномалий, выявляемых при поисках. Этим термином принято обозначать графическое изображение химического состава объекта, определенным образом упорядоченное и приведенное к виду, удобному для сравнения со сходными объектами [25]. Для построения геохимических спектров выбирается фиксированное (например, упорядоченное по кларкам) расположение рудных элементов по оси абсцисс при логарифмическом масштабе изображения их средних содержаний (или продуктивностей) по оси ординат. В этом случае различия или сходство между объектами выявляются путем передвижения одного из графиков вдоль оси ординат до их совмещения по основному рудному или любому другому элементу. Это исключает влияние не имеющих генетического смысла показателей «бедности» или «богатства» сопоставляемых объектов.

Различия между двумя сходными объектами можно выразить с помощью безразмерного геохимического показателя ν, числитель которого образует содержания элементов, находящихся в объекте *А* в избытке относительно объекта *Б*, знаменатель — содержания элементов, находящихся в объекте *А* в относительном дефиците. Мерой различий при этом будет величина отношения ν_{max}/ν_{min}.

По численным значениям ν_i возможна сравнительная оценка уровня эрозионного среза генетически однотипных объектов, хотя для более надежной оценки $\overline{Z}_i$ необходимо обращаться к показателям зональности эталонного месторождения (см. гл. 4). Эти же показатели служат для определения генетической



принадлежности к различным подтипам близких по характеристике объектов в предположении об их сходном срезе. Поскольку по одному признаку не могут одновременно решаться два вопроса, для устранения неопределенности следует принимать во внимание абсолютные содержания главнейших рудных элементов или их продуктивности (C_{max}, M_i, P_i). По аналогии с линейными геохимическими спектрами строятся круговые спектры (рис. 112). При этом способе элементам типоморфного комплекса отводятся фиксированные места на окружности. Относительные содержания элементов после деления на содержание основного металла изображаются в логарифмическом масштабе по соответствующим радиусам. Для сопоставления объектов и выбора ν круговые геохимические спектры совмещают по центру малого круга и одноименным радиусам.

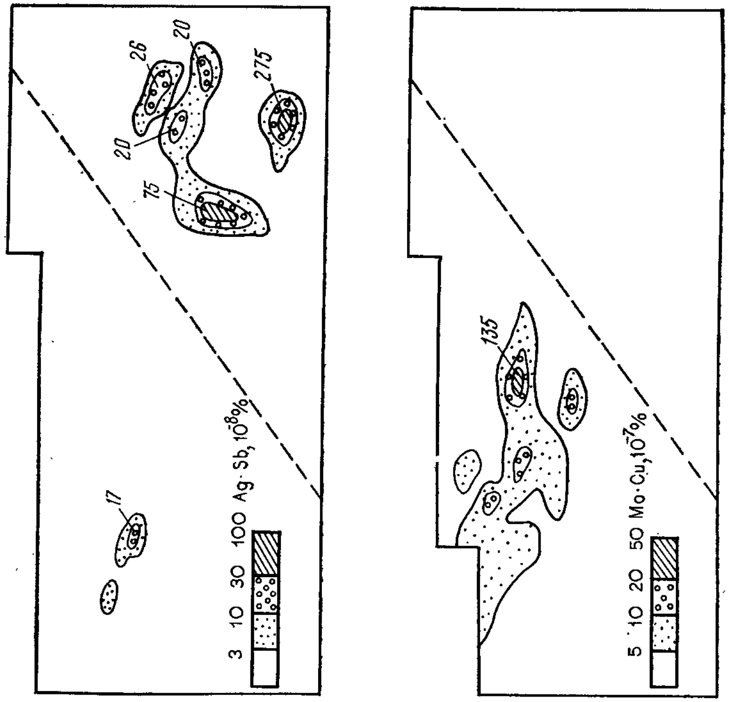
Для характеристики меднорудных объектов по круговым геохимическим спектрам был выбран геохимический показатель $\nu = \frac{Pb \cdot Ag}{Mo \cdot Co}$. Численные значения его относительно постоянны для месторождений одной формации, например 1 и 2 или 5 и 6 (см. рис. 112). Величины того же показателя для месторождений 1 и 6, относящихся к разным формациям, различаются в 145—600 раз. По величине этого показателя классифицировались медные объекты неясной принадлежности.

Метод геохимических спектров применяется для установления различий между сходными объектами — для сопоставления разных сечений одного месторождения, двух или нескольких сечений генетически однотипных месторождений, сходных геохимических аномалий, петрографически неразличимых пород и т. п. Задачи, связанные с многомерной классификацией сходных геохимических аномалий, успешно решаются на ЭВМ с применением факторного и кластерного анализов, путем исследования корреляционных зависимостей между геохимическими спектрами или матрицами коэффициентов корреляции [42]. Для разделения однородных геохимических данных эффективно применение дискриминантного анализа, упрощенным аналогом которого является метод геохимических спектров [25].

Один из критериев классификации и оценки гипергенных литохимических аномалий — их конфигурация в плане и приуроченность к формам современного рельефа, что обнаруживается при рассмотрении карт изоконцентраций рудных элементов в поле рассеяния. Если ось аномалии на горном склоне сечет

Рис. 110. Геологическая схема (*А*) и вторичные ореолы рассеяния свинца (*Б*) рудного поля Текелийской группы месторождений. *По В. Е. Флерову и С. А. Миляеву.*

1 — известняки подрудной пачки; *2* — переслаивание известняков, глинистых слайцев рудной пачки; *3* — углисто-кремнистые, углистые, углисто-глинистые сланцы надрудной пачки; *4* — глинисто-кремнистые сланцы; *5* — песчаники; *6* — андезитовые порфириты; *7* — гранит-порфиры; *8* — диабазовые порфириты; *9* — выходы рудных тел на дневную поверхность (*а*) и проекция слепых рудных тел (*б*); *10* — элементы залегания пород



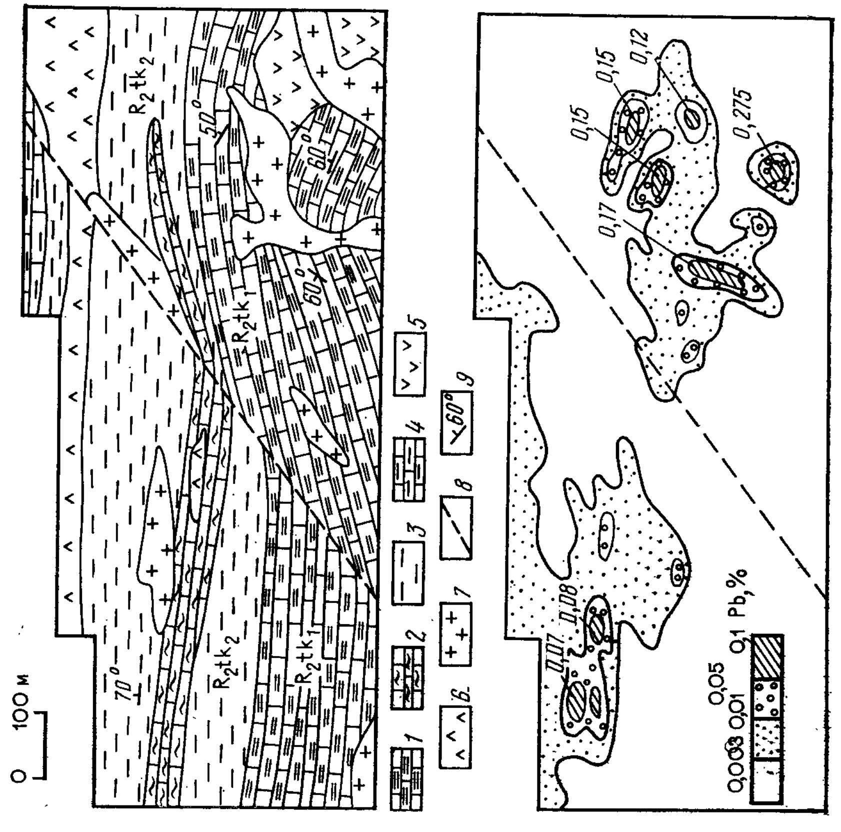


Рис. 111. Геологическая схема и вторичные ореолы рассеяния полиметаллического рудопроявления Левобережное. *По Р. А. Дегтяреву и С. А. Миляеву.*

1 — переслаивание известняков, известково-глинистых сланцев; 2 — глинистые известняки; 3 — углистые сланцы; 4 — углистые известняки; 5 — андезиты; 6 — диабазовые порфириты; 7 — гранит-порфиры; 8 — тектоническое нарушение; 9 — элементы залегания пород

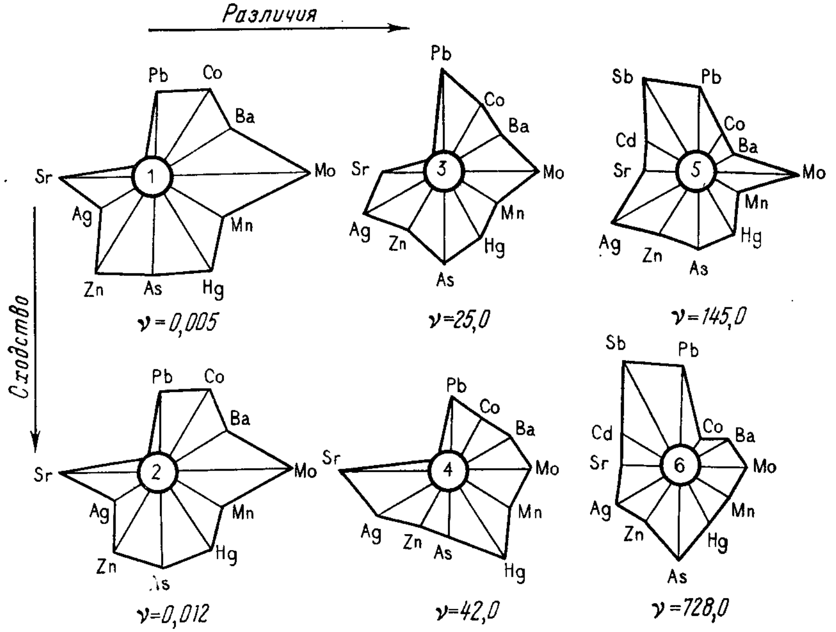


Рис. 112. Круговые геохимические спектры медных месторождений Спасской рудной зоны. Отношение средних содержаний 12 рудных элементов к содержаниям меди; диаметр круга равен lg10. *По И. А. Кошелевой.*

Формации: 1, 2 — молибденово-медная послесреднедевонская; 3, 4 — меднорудная послесреднедевонская; 5, 6 — меднорудная среднедевонская $\nu = \frac{Pb \cdot Ag}{Mo \cdot Co}$

горизонтали рельефа под острым углом и сохраняет свою прямолинейность при переходе через долину или водораздел — это характерный признак остаточного ореола рассеяния крутопадающей рудной зоны. Если изоконцентраты и ось аномалии повторяют изогипсы рельефа — это признак горизонтального залегания рудной зоны. Излом оси аномалии при переходе через водораздел или долину позволяет определить азимут падения рудной зоны. Если аномалия проявлена только на одном склоне и вытянута по градиенту рельефа, часть ее, приуроченная к нижнему вогнутому интервалу склона, вероятно, является шлейфом ореола и не имеет под собой коренного оруденения, которое следует ожидать только в районе верхнего отрезка аномалии (см. раздел 3.9).

Все эти особенности геохимического поля проявляются при условии правильного протягивания изолиний, и стандартная интерполяция по кратчайшему расстоянию между смежными профилями не всегда лучшая.

По результатам детальных и оценочных работ в зоне геохимической аномалии задаются первые горные выработки и скважины с целью вскрытия и опробования полезного ископае-

мого в коренном залегании. Разведку вторичных остаточных ореолов рассеяния при мощности рыхлых образований менее 3 м во всех случаях следует вести канавами. Менее надежна разведка геохимических аномалий шурфами, при которой возможен пропуск полезного ископаемого между выработками.

Вслед за горными работами или независимо от них, если геологические условия их исключают, в зоне геохимической аномалии, получившей благоприятную оценку, задаются поисково-разведочные скважины. Во всех случаях сплошное геохимическое опробование канав, шурфов и керна скважин обязательно.

Если параметры полезного ископаемого, встреченного выработками, и оценка прогнозных ресурсов объекта отвечают промышленным требованиям, ставится вопрос о переходе к его предварительной разведке. Данные геохимического опробования коренного оруденения при этом уточняют оценку его эрозионного среза и прогноз на глубину. В дальнейшем геологические задачи и конкретное содержание геохимических исследований определяются ходом разведочных работ. В менее благоприятном случае выработки могут встретить только непромышленную минерализацию и тогда, исходя из ее генетического типа и местных структурно-геологических условий, ставится вопрос о возможном ее признании надрудным первичным ореолом слепой залежи (см. рис. 55). Положительное решение этого вопроса требует бурения дополнительных более глубоких поисковых скважин. В обоих случаях успех геохимических исследований определяется знанием первичной зональности, закономерности развития надрудных ореолов и других геохимических особенностей генетически однотипных месторождений.

6.2.3. Отбор, обработка и анализ проб

Не подлежит сомнению, что лучшими должны считаться геохимические методы, с помощью которых поисковые съемки выполняются в движении, без пробоотбора, с дистанционным или контактным непрерывным определением содержаний химических элементов. К числу таких методов принадлежат, например, гамма-спектральные воздушные, автомобильные и пешеходные съемки, включая шпуровые, глубинные и каротажные исследования, при которых непрерывно или в дискретных точках, на поверхности Земли или в скважинах определяются содержания U (по Ra), Th и ^{40}K, обычно в автоматическом режиме. Без пробоотбора выполняются автомобильные и пешеходные съемки с бериллометрами, фторометрические и фосфорометрические нейтронно-активационные съемки, возможны борометрические, газо-ртутные воздушные и в приземной атмосфере, лазерные атмохимические (воздушные) и автомобильные по метану, аэрогеохимические по металлоорганическим соединениям и некоторые

другие. Все эти методы имеют различные перспективы дальнейшего развития и практического применения для геохимических поисков твердых полезных ископаемых. Некоторые из них незаменимы для решения специальных задач (например, аэрогеохимические поиски месторождений радиоактивных руд) или на стадии детальных работ и геологического осмотра геохимических аномалий. Однако заменить геохимические съемки с пробоотбором они пока еще не могут.

Ниже кратко рассматривается хорошо отработанная техника массового отбора, обработки и анализа различных литохимических проб, сложившаяся в результате многолетнего опыта.

Литохимические съемки по потокам рассеяния подчиняются местной гидросети и ведутся без топографической подготовки с полевой документацией пробоотбора на картах масштабов 1 : 100 000—1 : 50 000 или на контактных отпечатках аэрофотосъемки (обычно 1 : 30 000). Пробоотбор при среднемасштабных литохимических поисках по вторичным ореолам рассеяния ведется с попутным пикетажем по системе параллельных профилей, опирающихся на заранее геодезически проложенные магистрали, через каждые 10 см в рабочем масштабе съемки. Детальные литохимические съемки в масштабе 1:10 000 и крупнее выполняются по готовой топографической сети профилей и пикетов. Направление профилей во всех случаях выбирается вкрест господствующего простирания рудоконтролирующих структур.

При поисковых литохимических съемках по потокам и ореолам рассеяния в пробу отбирается местный «мелкозем» с соблюдением стандартных условий и минимальной глубины, определяемой положением представительного горизонта. Пробы помещаются в заранее нумерованные мешочки. Исходная масса пробы около 200 г.

Работы ведутся в летний период. Бригада под руководством старшего коллектора (младшего геолога) отбирает за смену в зависимости от категории местности из аллювия 20—30 проб при шаге 500 м, из элювио-делювия 100—200 проб при шаге 50—20 м. Затруднения с пробоотбором могут возникать в районах Крайнего Севера, где в результате морозного выветривания на поверхности горных склонов нередко развиты курумы — сплошной покров грубообломочных образований. Другой возможной причиной затруднений при пробоотборе в тех же районах является развитие на северных склонах мощного мохового покрова, непосредственно под которым даже в конце лета обнаруживается устойчивая мерзлота. В южных пустынях аридной зоны в элювиально-делювиальные образования привносится пылевидный материал эолового происхождения, разубоживающий вторичные остаточные ореолы рассеяния месторождений. В этих районах из проб следует удалять тонкую фракцию путем ее отсева через сито 0,25 мм.

В обычных условиях пробы, отбираемые при литохимической съемке, после сушки просеиваются через сито 1,0 мм (или 0,5 мм) с удалением крупной фракции в отвал. Исследования гипергенного поля рассеяния по тонкой фракции продуктов выветривания обеспечивают хорошую воспроизводимость результатов литохимической съемки.

При поисках по первичным ореолам ведется сплошное опробование стенок горных выработок и керна скважин методом «пунктирной борозды», путем объединения в одну пробу 8—10 сколков породы с заданного интервала. Обычная длина интервала опробования 2—5 м, на периферии рудного поля 10—20 м, масса пробы 300—350 г. Перед истиранием эти пробы проходят дробление и сокращение до 50—100 г.

При съемках любым из геохимических методов пробоотбор документируется в полевых журналах и, если не используются аэрофотоснимки или планы горных выработок, с глазомерным составлением абриса местности. Для оценки качества геохимических съемок проводится ежемесячный повторно-контрольный пробоотбор в объеме не менее 3 % [21].

Решающее значение для результатов геохимических поисков имеет анализ проб любым методом, удовлетворяющим следующим основным требованиям: 1) чувствительность анализа должна быть докларковой; 2) воспроизводимость — достаточной для решения поставленных геологических задач; 3) экспрессность — высокой, стоимость — минимальной. К ним можно добавить такие требования, как возможность выполнения анализа проб без химической подготовки и в полевых условиях, в том числе с портативными приборами, одновременное определение максимального числа элементов, охват большого диапазона содержаний — до 5—6 и более математических порядков, возможная простота и объективный характер документации результатов, полная автоматизация анализа и прямой ввод результатов в ЭВМ и др. Некоторые из этих требований носят противоречивый и трудно совместимый характер — например, высокая чувствительнось и точность при низкой стоимости анализа или портативность аппаратуры и максимальный перечень определяемых элементов.

В свое время основным из перечисленных требований в наилучшей степени удовлетворял эмиссионный спектральный анализ, на базе которого 50 лет назад в нашей стране возникли и получили эффективное применение геохимические методы поисков твердых полезных ископаемых. Спектральный анализ не потерял своего значения для геохимических поисков, однако разрыв между состоянием аналитической базы и требованиями поисковой практики ощущается весьма остро и продолжает углубляться. В настоящее время спектральный анализ на 40 химических элементов методом вдувания («просыпки») порошка пробы в стабилизированную дугу переменного тока выполняется на отечественных дифракционных спектрографах ДФС-13 (или ДФС-8) высокой разрешающей силы.

Расшифровка спектрограмм в большинстве экспедиционных лабораторий ведется визуально. Данные анализа во всех диапазонах содержаний, начиная от порога чувствительности, выражаются десятью дискретными цифрами на каждый порядок: 1; 1,2; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8. Это отвечает равномерной шкале в логарифмическом масштабе и является обязательным при геохимических поисках. В передовых лабораториях величина средней относительной погрешности независимых контрольных анализов не выходит за пределы $1{,}25^{\pm 1}$—$1{,}4^{\pm 1}$ (при допуске $1{,}5^{\pm 1}$). За счет высокой специализации исполнителей и разделения труда максимальная производительность в крупных полевых лабораториях геофизических экспедиций Казахстана в летние периоды достигала 2—4 тыс. проб в сутки при годовых объемах до 600—800 тыс. проб [25], в отдельные годы — до 1 млн.

Существенными недостатками рядового спектрального анализа являются неудовлетворительная чувствительность определения Au, W, Sb, Ta, Nb, As, P, Hg и необеспеченность геохимических лабораторий устройствами для автоматического ввода данных в ЭВМ. Наряду с эмиссионным спектральным анализом применяются другие методы.

1. Атомно-абсорбционный анализ на ртуть — высоко эффективный, универсальный и наиболее надежный метод, получивший широкое применение при любых видах геохимических съемок, включая анализ твердых, водных и газовых проб, а также растительности без озоления. Определения ведутся по интенсивности поглощения резонансной линии ртути 253,7 нм в газовой фазе исследуемой пробы. Атомизация ртути при анализе твердых проб ведется из навески 0,5—1,0 г путем ее нагрева до 700°, источником излучения служит ртутно-кварцевая лампа. При анализе пары ртути предварительно осаждаются на золотом сорбенте с последующей автоматической десорбцией и замером ее содержаний при визуальной цифровой или перопишущей регистрации.

2. Химико-абсорбционный анализ на золото со спектральным окончанием, предложенный Н. И. Сафроновым в 1955 г., широко применяется в СССР и других социалистических странах. Чувствительность определений $5 \cdot 10^{-7}$ % Au лишь немного уступает необходимой. С применением этого метода анализа в нашей стране выполняются все золотометрические съемки и сделаны основные промышленные открытия.

3. Атомно-абсорбционный пламенный спектральный анализ на обширную группу рудных элементов основан на измерении интенсивности поглощения монохроматического излучения данного элемента пара́ми анализируемой пробы, вводимой в пламя газовой горелки в форме раствора. Источником излучения служат наборы специальных ламп с полым катодом, обычно на три

рудных элемента каждая (например, Cu, Ni, Co). При анализе на один элемент производительность достигает 600 элементо-определений в час. Уступая эмиссионному анализу по технико-экономическим показателям, при близкой чувствительности, этот метод имеет существенно более высокую точность.

4. Ядерно-физические методы определения содержаний одного конкретного элемента. К ним относится фотонейтронный анализ на бериллий, основанный на ядерной реакции $^{9}Be+\gamma$ квант $\rightarrow {}^{8}Be + n$. Ядра бериллия обладают наименьшей энергией связи нейтронов — 1,666 МэВ, ближайший низкий порог фотонейтронной реакции имеет дейтерий — 2,226 МэВ. Облучая пробы или горные породы в естественном залегании γ-лучами с энергией больше 1,666, но меньше 2,226 МэВ, удается обеспечить высокую избирательность фотонейтронной реакции на Be. Таким источником служит радиоактивный изотоп ^{124}Sb с энергиями излучения 1,7—2,1 МэВ, эмиссия нейтронов измеряется пропорциональными счетчиками.

Нейтронно-активационным методом с полоний-бериллиевым источником определяют содержания фтора и косвенно — фосфора. Метод основан на ядерной реакции $^{19}F(n,\alpha)^{16}N$, протекающей на быстрых нейтронах. Гамма-излучение короткоживущего изотопа ^{16}N измеряется сцинтилляционным спектрометром. Чувствительность определений при шпуровой фторометрической съемке без пробоотбора составляет 0,1 %F, т. е. достаточна только для разведки. Анализ проб на фосфор основан на тесной корреляции его содержаний с содержаниями фтора в фосфоритах, основным минералом которых является фтор-апатит — $Ca_5[PO_4]_3F$.

Нейтронно-активационный анализ на золото по изотопу ^{198}Au с докларковой чувствительностью $n \cdot 10^{-8}$ % выполняется с мощными источниками нейтронов.

5. Быстро расширяется применение при геохимических поисках и рентгенорадиометрического анализа (РРА). Метод основан на облучении вещества γ-квантами и измерении характеристического вторичного излучения элементов. Преимуществами РРА являются простота и портативность аппаратуры, пригодной для работы в полевых условиях.

При РРА атомы возбуждаются на *K*- и *L*-уровнях электронной оболочки. Для облучения применяются изотопные источники, реже портативные рентгеновские трубки. Измеряются наиболее интенсивные линии характеристического излучения *K*-серии — α_1 и α_2, *L*-серии — α_1 и β_1, для регистрации вторичного γ-излучения служат сцинтилляционные, пропорциональные и полупроводниковые счетчики. Специально для РРА при геохимических поисках выпускаются двухканальные приборы РРША-1, РРК-103, «Поиск», одноканальные БРА-6, РПС4-01 «Гагара», РРК-102 «Минерал-6» и др.

Возможность оперативного полевого РРА реализуется путем определения суммы содержаний халькофильных элементов с близкими энергиями характеристического излучения. Порог обнаружения суммы халькофильных элементов при РРА составляет 0,005—0,01 %, основной вклад во вторичное рентгеновское излучение дают медь, цинк, свинец и мышьяк.

Применение РРА целесообразно на стадии детальных литохимических съемок при оценке геохимических аномалий известного элементного состава. Заменить другие методы анализа на стадиях мелкомасштабных геохимических съемок РРА не может.

6. За последние годы возобновился интерес к применению при геохимических поисках ионо-селективных электродов, использованных для этой цели еще в 1932—1937 гг. [34]. Неоспоримые преимущества спектрального анализа в то время привели к прекращению работ с этими электродами, однако современные достижения в технике их применения обусловливают пересмотр этого вопроса.

В ближайшем будущем допустимо ожидать появления принципиально новых методов измерения геохимического поля, способных повысить эффективность поисковых работ. Вместе с тем в повседневной практике не следует пренебрегать старыми, простейшими методами полевого химического и минералогического анализов. При геологическом осмотре остаточных ореолов рассеяния свинца и документации пройденных в их контуре канав совершенно обязательно применение полевой микрохимической реакции на Pb с 10 %-ным раствором HNO_3 (растворитель) и 3 %-ным раствором KI (проявитель). По своей эффективности эта простейшая реакция превосходит любые портативные анализаторы новейших моделей.

В любом случае желательно анализ проб проводить на минимальном удалении от участка полевых работ и результаты их получать немедленно после пробоотбора. Это оправдывает попытки создания полевых лабораторий в автобусах и автоприцепах с автономным энергоснабжением. В необжитых районах применение таких передвижных лабораторий может быть весьма эффективным. Однако передвижение их ограничено условиями проходимости, а при редкой сети поискового пробоотбора всегда выгоднее доставить пробу в лабораторию, нежели подвозить лабораторию к месту ее взятия. Радикальное решение проблемы сроков анализа обеспечивают только геохимические съемки без пробоотбора.

Несомненную целесообразность быстрейшего получения результатов анализа проб иногда ошибочно связывают с немедленным переходом к детализации каждой выявляемой аномалии. Такой подход противоречит рациональной практике работ. Если геологическим заданием предусмотрены геохимические поиски на большой территории, переходить к детализации аномалий следует после завершения съемок на 30—40 % площади, когда возможна сравнительная оценка полученных данных.

Разнообразные методы экспресс-анализа проб, применяемые при геохимических поисках, в той или иной степени различаются по сложности и затратам времени на их выполнение. Однако возможность получения результатов анализа проб в тот же день, через месяц или через полгода не является свойством метода анализа, а целиком зависит от организации работ.

Самостоятельную задачу, не связанную с массовым анализом геохимических проб, составляет изучение форм нахождения рудных элементов в геохимических аномалиях различного генезиса. Для изучения минерального состава литохимических потоков и остаточных ореолов рассеяния части рудных элементов, представленных тяжелыми устойчивыми минералами, применяется анализ шлихов после промывки в лотке 10—12 кг аллювия из точек C'_{max} или элювио-делювия из области C_{max}. Однако шлиховой анализ не пригоден для изучения солевых форм рассеяния, а также легких и наиболее тонких фракций механической составляющей. Традиционно эти задачи решались методами фазового химического анализа, результаты которого не могут считаться однозначными.

Новые возможности в этой области открылись с появлением электронных микрозондов [32].

Геохимические поиски месторождений — это во всех случаях научное исследование и, применяя в повседневной работе те или иные аналитические методики, полезно помнить, что «всегда существует лучший метод».

6.2.4. Оценки прогнозных ресурсов

Оценки прогнозных ресурсов по категориям достоверности P_3, P_2, P_1 ведутся по данным геологических, геохимических и геофизических исследований в сочетании с горными работами и бурением. В составе этих работ важная роль принадлежит именно геохимическим данным, которые выражаются в цифрах содержаний ценных элементов полезного ископаемого. Поисковые геохимические съемки последовательно возрастающей детальности в сочетании с обработкой данных на ЭВМ позволяют повторять эти подсчеты на разных стадиях работ. Решающее значение для оценки прогнозных ресурсов имеют генетическая принадлежность и структурно-геологические условия локализации выявленных месторождений. Предполагая, что все необходимые геологические данные приняты во внимание, рассмотрим количественные показатели, которые служат для геохимического обоснования этих оценок.

Количественная интерпретация данных при региональных, поисковых и детальных литохимических съемках подчиняется последовательному рассмотрению содержаний металла в геохимических аномалиях — ореолах и потоках рассеяния, их продуктивностей и ресурсов металла в объектах постепенно возрастающей достоверности (табл. 26). На принципах этой последо-

Таблица 26

Последовательность рассмотрения параметров литохимических потоков и ореолов рассеяния [31]

Номер	Показатель	Размерность	Формула
1	Максимальное содержание металла	%	C'_{max}; C_{max}
2	Количество металла в ореоле рассеяния по профилю (линейная продуктивность)	м %	$M = \Delta x \left(\sum_{x=1}^{n} C_x - nC_ф\right) = M_p k$
3	Продуктивность потока рассеяния	м² %	$P' = S_x\left(C'_x - C'_ф\right) = k'P$
	Продуктивность ореола рассеяния	м² %	$P = \Delta x 2l\left(\sum_{x=1}^{N} C_x - NC_ф\right) = kP_p$
	Количество металла на 1 м углубки	т/м	$q' = \frac{p'}{40}$; $q = \frac{P}{40}$
4	Прогнозные ресурсы:		
	P_3	т	$Q'_H = \frac{1}{k' \cdot k} \cdot \sum_{i=1}^{m} q'_i \cdot H$
	P_2	т	$Q_H = \frac{1}{k} \cdot q \cdot H$
	P_1	т	$Q^*_H = \alpha \frac{1}{k} \cdot q^* H^*$

вательности возможно построение схемы интерпретации при геохимических поисках другими методами.

Величины, входящие в формулы, по которым подсчитываются прогнозные ресурсы всех трех категорий, кроме глубины H, однозначно определяется при литохимических съемках; методы их оценки подробно обсуждались. Для относительно крутопадающих (не горизонтальных) залежей глубина подсчета выбирается по геологическим данным с учетом генетического типа и уровня эрозионного среза оруденения, или ограничивается фиксированным интервалом. Очевидно, что правильность оценки прогнозных ресурсов в большой мере зависит от выбора глубины подсчета. Однако основными причинами неподтверждения прогнозных оценок при геохимических поисках являются неблагоприятные морфологические особенности оруденения, низкое и

неравномерное содержание металлов, иногда — систематическое завышение результатов спектрального анализа. В ряде случаев неправильное представление о форме и геолого-структурных условиях залегания рудных тел ведут к преждевременному прекращению разведочных работ после неудачной проходки первых выработок и скважин, оставляя неясной правильность прогнозной оценки. Примеры подтверждения первоначальной геохимической оценки при повторной разведке таких месторождений известны.

Выбирая величину H в разумных (и достаточно скромных!) пределах, последующее сопоставление цифр прогнозных ресурсов с разведанными запасами можно ограничить именно этой глубиной, независимо от глубины, до которой прослежено промышленное оруденение. Поэтому подсчеты прогнозных ресурсов Q_H' и Q_H при недостатке других данных нередко ограничивают глубиной 100 м для месторождений Be, Co, Ta, Ag, Au, Hg, Bi и 200 м для месторождений F, P, Ni, Cu, Pb+Zn, Nb, Mo, W, Sn, Sb. В последующем, оценки Q_{100} или Q_{200} могут быть увеличены в кратное число раз, в зависимости от уточненных данных о протяженности руд на глубину. Вероятность завышенных оценок за счет преувеличенной глубины подсчета при этом становится минимальной.

Оценки прогнозных ресурсов по приведенным формулам «полотном» до глубины H эквивалентны подсчетам «треугольником» до глубины $2H$. Подсчеты до фиксированных глубин 100 и 200 м отвечают представлениям о выклинке руд на глубине соответственно 200 и 400 м, обычной для месторождений среднего масштаба. Между тем при геохимических поисках не исключается обнаружение более крупных месторождений, руды которых могут прослеживаться на значительно большую глубину. Протяженность промышленного оруденения от поверхности на глубину до 1000—1200 м и более для крупных месторождений цветных, редких металлов и золота не является исключением. Следовательно, подсчеты до указанных фиксированных глубин, которые можно характеризовать как осторожные, для объектов, превышающих размеры средних месторождений, будут заведомо занижены. В итоге оценки прогнозных ресурсов, в задачу которых входит правильная ориентировка поисковых работ, не достигнут цели. Поэтому глубину подсчета целесообразно варьировать — увеличивая ее, если ожидается крупное месторождение, и уменьшая, если ожидается мелкий объект. Геохимическим критерием такого выбора удобно сделать площадную продуктивность оруденения P (в м²%) и этот подход реализован в действующей инструкции [21].

Согласно принципу геометрического и геохимического подобия генетически однотипных объектов различной крупности имеем

$$H_{i\,\text{полн}} : H_{\text{полн. эт}} = \sqrt{P_{\text{р}\,i} : P_{\text{р эт}}}\,,$$

где $H_{i\,\text{полн}}$ и $H_{\text{полн. эт}}$ — протяженности i-го и эталонного объектов на глубину от уровня 0,2 до уровня 0,8.

Приняв за эталон мелкое по масштабу запасов месторождение с заданными параметрами, можно по величине продуктивности оцениваемого объекта определить его ожидаемую протяженность на глубину. Реальная глубина подсчета H_i определяется эрозионным срезом оруденения $z>0{,}2$ и согласно формуле (107) будет меньше $H_{i\,\text{полн}}$. При надрудном срезе месторождения величина $(P_{\text{р}})_i$ подлежит пересчету на уровень 0,2, согласно зависимости (105).

Задачу выбора глубины подсчета прогнозных ресурсов как функции продуктивности оруденения можно решить аналитически. Обозначая $H_{\text{полн}} = \beta\sqrt{q_{\text{р}}}$, имеем для случая $z=0{,}2$

$$Q_H = \beta q_{\text{р}}\sqrt{q_{\text{р}}}\,, \qquad (110)$$

где

$$\beta = H_{\text{полн. эт}}\sqrt{\frac{H_{\text{полн. эт}}}{Q_{\text{полн. эт}}}}\,. \qquad (111)$$

Здесь $q_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{40}$ — продуктивность коренного оруденения на уровне его устойчивых значений ($0{,}2 \leqslant z \leqslant 0{,}8$) в тоннах на один метр углубки. Задаваясь модельными представлениями о полных запасах металла и полной протяженности рудного интервала для эталонного месторождения данного генетического типа, можно найти численные значения β. В зависимости от стадии работ $q_{\text{р}}$ может определяться через суммарную продуктивность смежных потоков рассеяния $\sum_{i=1}^{m} P_i'$, через продуктивность вторичных ореолов P или непосредственно по величине продуктивности коренного оруденения $P_{\text{р}}$, включая надрудные сечения первичного ореола с применением соответствующих пересчетов. Для геометрических фигур подобия численные значения β не зависят от класса крупности месторождений. Достоинства формулы (110) заключаются в ее универсальности и простоте. Однажды сделанный хорошо обдуманный выбор модели устраняет необходимость многократных субъективных решений о целесообразной глубине подсчета H, при которых вносится переменная погрешность.

Формула (110) отвечает подсчету при уровне эрозионного среза месторождения 0,2. Во всех других случаях необходим его учет. На стадии литохимических съемок масштаба 1 : 200 000 по потокам рассеяния прямая оценка эрозионного среза оруденения не только затруднительна для всей площади выявленного объекта (иногда более 100 км²), но и достаточно бесполезна. Независимо от результатов оценки z новый объект с большой величиной $\Sigma P_i'$ подлежит безоговорочному дальнейшему изучению литохимическими съемками по вторичным ореолам рассеяния.

Поэтому на первой стадии геохимических поисков допустимо для объекта в целом условно принимать z равным 0,5, справедливо предполагая, что в пределах обширного рудного поля возможны тектонические блоки с различными значениями $\bar{z}$. При более детальных литохимических съемках по вторичным остаточным ореолам рассеяния или по первичным ореолам оценка эрозионного среза является обязательной.

Для подсчетов ресурсов по категориям P_3 и P_2 обязательным является геологический осмотр участка на местности. Для подсчетов по категории P_1 обязательно вскрытие рудных тел и опробование руд в коренном залегании. По существующим правилам результаты подсчетов прогнозных ресурсов рекомендуется округлять до первой значащей цифры. Это требование не согласуется с десятичной, т. е. логарифмической классификацией месторождений по запасам и делает оценки не равноточными внутри каждой декады. Более правильно округление вести до следующих ближайших цифр: 1; 1,2; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8, в полной аналогии с дискретными значениями, принятыми для результатов эмиссионного спектрального анализа.

6.3. ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

В основе геохимических методов поисков газонефтяных месторождений лежит теория осадочно-миграционного происхождения нефти, согласно которой рассеянное органическое вещество осадочных горных пород в условиях длительного прогибания крупных участков земной коры служит источником образования углеводородов (УВ). В том или ином количестве рассеянные УВ содержатся во всех породах стратисферы, определяя повсеместное существование их фоновых содержаний в геохимическом поле. Миграция жидких и газообразных УВ из материнских пород в пласты-коллекторы и ловушки приводит к формированию газонефтяных залежей. Сопутствующее и последующее рассеяние УВ ведет к образованию над залежами геохимических аномалий в твердой, жидкой и газообразной фазах. Миграция УВ газонефтяной залежи через перекрывающие породы изменяет их физико-химические характеристики и газовый состав подземной атмосферы, ведет к формированию зоны аномальных содержаний микроэлементов и к появлению минеральных новообразований. Геохимические поиски нефти и газа (ГПНГ) ведутся путем выявления этих аномалий методами различных съемок. Наличие газонефтяных залежей является только одной из причин появления геохимических аномалий в поле УВ и выявляемые аномалии подлежат оценке с учетом геологических и геофизических данных. Сочетания различных видов и масштабов геохимических съемок при поисках месторождений нефти и газа, а также размеры исследуемых площадей были приведены в табл. 22. На стадиях среднемасштабных и детальных съемок, как правило, поисковые геохимические исследования ведутся на нескольких горизонтах, одновременно с опробованием керна и шлама буровых скважин.

Из числа различных методов ГПНГ важнейшее значение имеют атмохимические съемки, основанные на определении содержаний УВ газов. На рис. 87 была приведена схема образования газового ореола рассеяния над нефтяной залежью антиклинального типа в вариантах «прямой» и «кольцевой» аномалий.

В СССР число залежей нефти и газа, не связанных с антиклиналями, составляет всего 5—6 %. В отдельных районах США доля добычи нефти и газа из таких залежей составляет от 17 до 80 % [4]. При поисках месторождений, не связанных с антиклинальными складками, роль геохимических методов существенно возрастает. Длительно господствовавшая теория диффузионного формирования газовых ореолов рассеяния за последнее время сочетается с теорией инфильтрационного образования аномалий. В пользу совместного протекания процессов фильтрации и диффузии говорит быстрое формирование углеводородных аномалий над подземными искусственными газохранилищами.

Геохимические методы поисков нефтяных месторождений возникли в СССР одновременно с методами геохимических поисков рудных месторождений. Однако в настоящее время уровни их развития, широта применения и роль в геологоразведочной практике существенно различны. Наряду с геологическими методами, решающая роль при поисках месторождений нефти и газа и подготовке нефтеперспективных структур к глубокому бурению принадлежит методам разведочной геофизики — в первую очередь сейсмо- и гравиразведке. Современные методы сейсморазведки обеспечивают с высокой детальностью построение структурно-геологических разрезов на глубину до нескольких километров, в сравнении с чем результаты геохимических съемок выглядят весьма скромно.

Это определило подчиненную роль геохимических съемок при поисках месторождений нефти. До последнего времени проводились в основном безмасштабные съемки на многочисленных разобщенных участках или по серии профилей и опытно-методические работы без регулярной сети.

Понимание роли геохимических методов для повышения эффективности поисков месторождений нефти и газа определило пересмотр существовавшей практики и переход к регулярным съемкам обширных площадей. В настоящее время общепризнана необходимость четырехстадийного производства геохимических поисков нефти и газа согласно следующей схеме [4, 12, 13]: 1) региональные геохимические съемки масштаба 1 : 1 000 000—1 : 500 000; 2) прогнозно-рекогносцировочные съемки масштаба 1 : 200 000; 3) поисково-оценочные съемки масштаба 1 : 50 000; 4) детальные съемки масштаба 1 : 25 000 и безмасштабные работы (рис. 113). Четырехстадийный поисковый цикл еще не испытан ни в одном нефтегазоносном бассейне (НГБ) [12]. Заметим, что трехстадийное производство поисковых

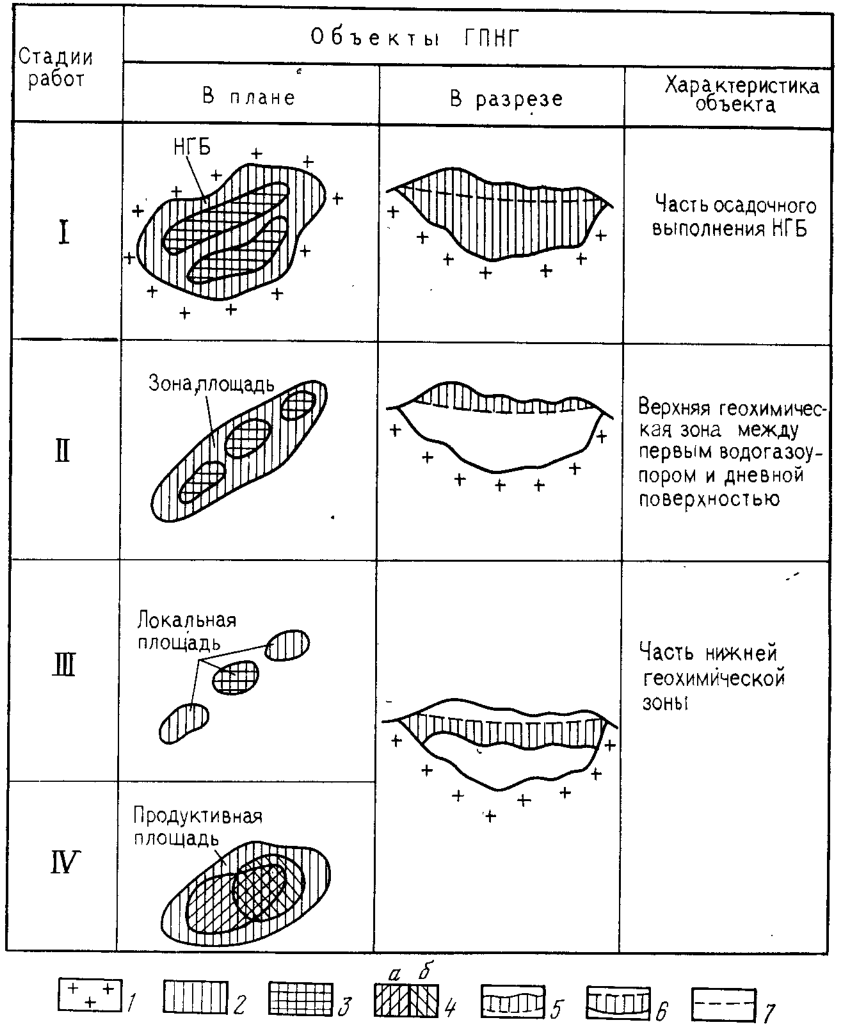


Рис. 113. Объекты исследования при геохимических поисках нефти и газа [11].

1 — породы фундамента; *2* — объект геохимических исследований данной стадии; *3* — объект, выделяемый для последующих работ; *4* — предполагаемый *(а)* и уточненный *(б)* участки размещения скважин; *5* — верхняя геохимическая зона; *6* — нижняя геохимическая зона; *7* — первый регионально выдержанный водогазоупор

литохимических съемок по схеме 1 : 200 000→1 : 50 000→1 : 10 000 отвечает многолетней практике работ в рудных районах. Зарубежный, главным образом американский опыт ГПНГ в значительной мере основан на советских методических разработках.

Методика ГПНГ изменяется в зависимости от стадии их проведения. На первой стадии выполняются атмохимические (газовые) съемки с определением содержаний метана и ТУВ в неглубоких (до 25—30 м) скважинах по сети (5—10)×2 км. За последние годы на этой стадии применяют лазерные атмохимические автомобильные и воздушные съемки.

Геохимическая лазерная лаборатория ГЛА-1, сконструированная в Институте ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ), смонтирована на автомашине ГАЗ-66 и позволяет вести непрерывные измерения содержаний метана в пробах, отбираемых из приземного слоя атмосферы, при скорости движения до 50 км/ч. Чувствительность аппаратуры 10^{-5} % CH_4, быстродействие 10 с, что обеспечивает надежную регистрацию фоновых содержаний метана и удовлетворительную воспроизводимость результатов. Автомобильные атмохимические съемки по маршруту Москва — Ташкент выявили ряд региональных газовых аномалий, приуроченных к крупным элементам геологической структуры. Полученные результаты подтверждают целесообразность развития подобных исследований. Однако производство автомобильных геохимических съемок ограничено условиями проходимости территорий для автотранспорта. Эти ограничения не распространяются на лазерные аэрогеохимические съемки, производство которых наиболее эффективно на стадии регионального изучения НГБ.

Лазерные методы зондирования атмосферы получили первоначальное применение при экологических исследованиях с целью выявления источников загрязнения окружающей среды (CO; SO_2, Hg) и утечек из газопроводов. Различные лазерные источники и методы обнаружения газо-индикаторов были предложены для поисков месторождений полезных ископаемых. В настоящее время с докларковой чувствительностью в атмосфере определяются содержания CH_4, ТУВ, H_2S, SO_2, I_2, Hg и других газов. Для ГПНГ эти методы получили применение в форме лазерных метановых съемок, два варианта которых показаны на рис. 114.

Аэрогеохимические и автомобильные лазерные съемки с использованием топографических отражателей или специальных зеркал (см. рис. 114, *а*) основаны на измерении сравнительной интенсивности отраженного излучения двух близких длин волн излучателя λ_1 и λ_2, из которых λ_1 отвечает линии резонансного поглощения определяемого газа, а λ_2 лежит за ее пределами. Измерения на двух близких длинах волн исключают влияние флуктуаций состава атмосферы. Метод рассеянного излучения (см. рис. 114, *б*) состоит в измерении мощности двух аналогичных лазерных импульсов λ_1 и λ_2, рассеянных в обратном направлении присутствующими в атмосфере аэрозолями на передней (R_1) и задней ($R_1+\Delta R$) границах зондируемого участка атмосферы. Протяженность расстояний R_1 и $R_1+\Delta R$ от излучателя определяется величинами времени запаздывания прихода обратных лазерных импульсов. При автомобильной лазерной геохимической съемке с зеркальным отражателем по профилю через Анастасиевско-Троицкое газонефтяное месторождение на

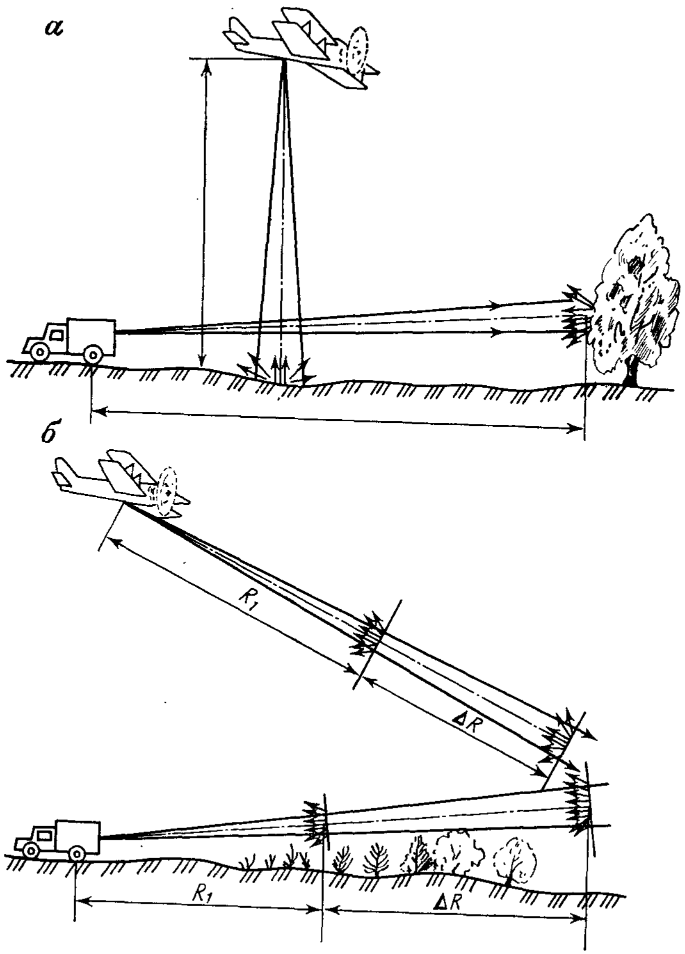


Рис. 114. Лазерная геохимическая съемка. *По И. М. Назарову и др.*
а — с использованием топографических отражателей; *б* — с измерением рассеянного отражения

отрезке около 2 км отметилась четкая метановая аномалия. Лазерные аэрогеохимические съемки были успешно проведены на обширной территории в северо-восточном Прикаспии. Наиболее благоприятны для атмохимических съемок, в том числе для аэросъемок, районы аридной зоны; над заболоченными территориями возникают существенные помехи по метану. В США изучаются возможности дистанционных ГПНГ из космоса путем определения в приповерхностных слоях атмосферы содержаний иода по оптическому спектру отраженных от земли солнечных лучей. Соответствующие исследования состава нефтей показывают, что аномальные концентрации иода в приземной атмосфере способны фиксировать залежи углеводородов (УВ) на глубине [4].

На второй стадии ГПНГ выполняются те же атмохимические съемки с глубиной пробоотбора до 30 м в масштабе 1 : 200 000 в пределах площадей с аномальными характеристиками показателей нефтегазоносности или структурных поднятий. Не заменяя этих наземных съемок, они могут дополняться аэрогеохимическими и(или) автомобильными съемками того же или ближайшего более крупного масштаба. Атмохимические съемки этой стадии выборочно дополняются гидро- и литохимическими исследованиями. Благоприятными гидрохимическими показателями нефтеносности являются бессульфатность вод, высокие содержания иода и растворенных УВ газов. В задачу прогнозно-рекогносцировочных съемок входит выделение площадей для постановки поисково-оценочных геохимических работ и последующего поискового бурения.

На третьей стадии ГПНГ атмохимические съемки на нефтеперспективных площадях ведутся на нескольких опорных горизонтах, ниже зоны активного воздействия метанокисляющих бактерий и атмосферного кислорода, в интервале глубин от 30 до 200 м. Съемки выполняются в масштабе 1 : 50 000 при числе проб 5—20 в пункте пробоотбора, включая опробование керна, бурового раствора и пластовых вод. Помимо метана и ТУВ в пробах определяются содержания неуглеводородных газов (CO_2, H_2, He, Ar, H_2S), ведутся битуминологические гидро- и литохимические исследования.

Первым от дневной поверхности представительным горизонтом для ГПНГ считается верхний регионально выдержанный в разрезе НГБ водогазоупор. На поисково-оценочной стадии атмохимические съемки ориентируются на опробование всей мощности представительного горизонта. При обнаружении локальных аномалий УВ газов проводятся дополнительные съемки по двум-трем опорным горизонтам гипсометрически ниже первого, при необходимости до глубины 600—700 м. При атмохимической съемке по профилю через нефтяное месторождение Каражамбас (Западный Казахстан) содержания CH_4 Σ ТУВ и Не определялись в пробах керна из неглубоких скважин (25—30 м), пройденных с шагом 800—400 м. На графиках положение нефтяной залежи и тектонических разломов фиксировалось высокоаномальными содержаниями газовых компонентов. Аномальные содержания паров ртути были отмечены в почвенном воздухе из скважин глубиной 1—2 м над Пальяновским нефтяным месторождением при глубине до залежи 2500 м [46].

На четвертой стадии выполняются детальные геохимические съемки в масштабе 1 : 25 000 или безмасштабно с числом проб до 20—60 на точку наблюдения. Задачей ГПНГ на этой стадии является оптимизация размещения поисковых скважин в пределах выявленной газонефтяной структуры и обоснование выбора точек для глубокого бурения.

Поисковыми геохимическими работами 1970—1980 гг. в СССР выявлено 320 нефтеперспективных аномалий, из которых 46 проверялись глубоким бурением, в 80 % случаев с положительными результатами. Этот высокий процент успеха в значительной мере связан с тем, что большинство рекомендаций геохимиков совпадало с рекомендациями геофизиков [12].

Наибольшие перспективы для дальнейшего развития методики ГПНГ имеют литохимические исследования [4, 13]). Миграция УВ из газонефтяной залежи по продолжительности соизмерима с периодом ее существования и приводит к глубоким минералого-геохимическим преобразованиям перекрывающих пород. Участие УВ в окислительно-восстановительных процессах ведет к повышению pH и снижению Eh, в результате чего возникают минеральные новообразования и происходит перераспределение микроэлементов. При этом, в отличие от газовых аномалий, фиксирующих ход рассеяния, образующиеся литохимические аномалии являются интегральным результатом длительно протекавшего процесса. В числе минеральных новообразований в контуре пород над нефтяными залежами отмечаются сульфидизация, окремнение, карбонатизация, доломитизация, накопление радиоактивных элементов, Mn, V, Pb, Cu, Co, Ba и некоторых других микроэлементов. Убедительные данные о нефтепоисковом значении карбонатной съемки были опубликованы в США. За 38 лет ведения этой съемки на площади 320 тыс. км^2 (875 тыс. анализов почв) выявлено 160 геохимических аномалий, проверка которых бурением привела к открытию 38 нефтегазоносных структур. Современные методы автоматизированной обработки данных на ЭВМ смогут существенно повысить эффективность литохимических поисков глубокозалегающих месторождений нефти и газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи в области дальнейшего совершенствования теории и широкого практического применения геохимических методов поисков весьма многообразны и достаточно очевидны. Необходимы дальнейшее повышение геолого-экономической эффективности поисковых геохимических работ во всех районах их проведения и расширение перечня полезных ископаемых, при поисках которых эти методы применяются. Первостепенное значение будет иметь увеличение глубинности геохимических поисков в любых геологических и ландшафтных условиях, а также повышение надежности оценки выявляемых геохимических аномалий. Решение последней задачи потребует развития существующих и создания новых, более точных методов подсчета прогнозных ресурсов полезных ископаемых с учетом генетических особенностей и геолого-структурных условий залегания основных промышленных типов месторождений.

В ближайшие годы предстоит выполнять возрастающие объемы поисковых геохимических съемок по стандартной методике в различных масштабах и с различными геологическими целями. В горнорудных районах Сибири и Северо-Востока СССР предстоит закончить литохимические съемки масштаба 1 : 200 000 по потокам рассеяния и продолжать планомерные литохимические съемки масштаба 1 : 50 000 и крупнее по вторичным ореолам рассеяния. В геологически менее изученных рудных районах развивающихся стран Азии, Африки и Латинской Америки предстоит в той же последовательности провести поисковые литохимические съемки начиная с масштаба 1 : 1 000 000.

На закрытых территориях рудных районов с ограниченной мощностью перекрывающих отложений, в том числе в «старых» горнорудных районах СССР и других развитых стран, в ближайшие годы в возрастающих объемах будут проводиться геохимические поиски погребенных месторождений по их наложенным ореолам рассеяния на поверхности чехла, в том числе по ореолам галоидов. В пределах рудных полей промышленных месторождений будут продолжаться поиски слепых рудных тел по их первичным ореолам, одновременно с детальными исследованиями первичной зональности геологически хорошо изученных (эталонных) месторождений. Наконец, на обширных пространствах нефте- и газоперспективных территорий предстоит расширить систематическое производство различных геохимических съемок, по примеру их эффективного проведения при поисках твердых полезных ископаемых.

Выполнение больших объемов поисковых геохимических работ будет сопровождаться изменениями состава применяемых методов. Можно уверенно предвидеть быстрое развитие атмохи-

мического метода поисков рудных месторождений на основе новейших средств аналитической техники, включая прямое определение паров тяжелых металлов и создание высокочувствительных рецепторов на принципах, заимствованных из области бионики. Прогресс в области геохимических методов поисков следует связывать с коренным улучшением аналитической базы этих работ. Решение этой проблемы можно ожидать при переходе к полностью автоматизированному нейтронно-активационному анализу литохимических проб с прямым вводом данных в память ЭВМ. Это же относится к автоматизации газового, в частности, хроматографического, лазерного и масс-спектрометрического анализов атмохимических проб. Только при ликвидации разрыва между анализом проб и вводом аналитических данных в ЭВМ откроются возможности автоматизированной системы обработки геохимических данных (АСОГД). Широкая автоматизация процессов сбора, обработки, хранения и картографирования поисковых данных, включая построение многоцветных и трехмерных (объемных) геохимических карт и разрезов, составляет безотлагательную задачу ближайшего времени.

В ближайшей перспективе следует предвидеть успешную разработку принципов оптимизации решений, принимаемых при ведении поисковых геохимических работ, что потребует обращения к задачам линейного программирования, теории стратегических игр и другим специальным разделам современной математики. В целом для дальнейшего развития и широкого применения геохимических методов поисков существует множество различных возможностей. Обилие нерешенных задач делает исследования в этой области чрезвычайно плодотворными и увлекательными.

Учение о геохимических поисках месторождений полезных ископаемых — один из самых динамичных разделов геологических наук. Это подтверждается научной активностью в этой области, отражением которой служат многочисленные всесоюзные и региональные совещания, конференции и семинары, организуемые в различных городах нашей страны и за рубежом. Специальная подсекция геохимических методов поисков входила в структуру 27 сессии Международного геологического конгресса в Москве (1984 г.).

Среди молодых геохимиков иногда бытует ложное мнение, что исследование форм нахождения мышьяка в образце лимонита — это наука, а анализ данных о содержаниях 12—15 рудных элементов в 100 тыс. геохимических проб — это задача геологического производства, далекая от целей истинной науки. Ошибочность этих представлений вполне очевидна. Огромный объем информации, заключенный в объективных данных поисковых геохимических съемок, требует от исследователя глубокого научного и творческого осмысливания. Если при этом всесторонний геологический, геохимический и физико-математический анализ этих данных приводит к открытиям крупных промышленных месторождений полезных ископаемых — результаты этих исследований приносят ученому ни с чем не сравнимое высокое моральное удовлетворение. Города на карте СССР — Билибино, Губкин или Лутугино названы в честь Ю. А. Билибина (1901—1952), И. М. Губкина (1871—1939), Л. И. Лутугина (1864—1915) не только потому что, подобно многим другим, они были крупнейшими учеными-геологами. Эту честь они заслужили потому, что прославили нашу Родину выдающимися открытиями ее минеральных богатств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абисалов Э. Г.* Опережающие литохимические поиски по потокам рассеяния.— Разведка и охрана недр, 1977, № 9, с. 20—24.

2. *Антропова Л. В.* Формы нахождения элементов в ореолах рассеяния рудных месторождений. Л., Недра, 1975.

3. *Аристов В. В.* Методика геохимических поисков твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1984.

4. *Архипов А. Я., Кучерук Е. В., Петухов А. В.* Геохимические методы поисков месторождений нефти и газа. М., ВИНИТИ, 1980. (Итоги науки и техники, т. 5).

5. *Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., Наука, 1981.

6. *Беус А. А., Григорян С. В.* Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1975.

7. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. М., Наука, 1980.

8. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. 4-е изд. М., Наука, 1969.

9. *Вернадский В. И.* Избранные сочинения. Т. 1 АН СССР, М., 1954.

10. *Воробьев С. А., Шваров Ю. В.* Программы для обработки геохимических данных на микрокалькуляторах. М., Недра, 1984.

11. *Геохимические* методы поисков месторождений нефти и газа. М., Наука, 1983.

12. *Геохимические* методы поисков нефтяных и газовых месторождений/ *О. В. Барташевич, Л. М. Зорькин, С. Л. Зубайраев* и др. М., Недра, 1980.

13. *Геохимические* методы поисков глубокозалегающих рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1980.

14. *Геохимические* поиски рудных месторождений в СССР. М., Госгеолтехиздат, 1957 (Труды I Всесоюзного совещания по геохимическим методам поисков рудных месторождений).

15. *Гидрогеохимические* методы поисков рудных месторождений и прогноза землетрясений. Новосибирск, Наука, 1983.

16. *Голубев В. С., Шарапов В. Н.* Динамика эндогенного рудообразования. М., Недра, 1974.

17. *Григорян С. В.* Первичные геохимические ореолы при поисках и разведке гидротермальных месторождений. — Советская геология, 1973, № 1, с. 15—33.

18. *Добровольский В. В.* География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М., Мысль, 1983, 272 с.

19. *Досанова Б. А., Колесников В. Н., Воробьев С. А.* Атмохимические поиски погребенных месторождений. — Разведка и охрана недр, 1979, № 1, с. 19—24.

20. *Дубов Р. И.* Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений. Новосибирск, Наука, 1974.

21. *Инструкция* по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., Недра, 1983.

22. *Квятковский Е. М.* Литохимические методы поисков эндогенных рудных месторождений. Л., Недра, 1977.

23. *Ковалевский А. Л.* Биогеохимические поиски рудных месторождений. 2-е изд. М., Недра, 1984.

24. *Крайнов С. Р., Швец В. М.* Основы геохимии подземных вод. М., Недра, 1980.

25. *Литохимические* поиски рудных месторождений. — Сб. трудов I Сессии Межведомственного совета по научным основам геохимических методов поисков. Алма-Ата. Наука, 1972.

26. *Мезенцев О. К.* Погребенные ореолы рассеяния гидротермальных месторождений Урана. М., Атомиздат, 1975.

27. *Основы* гидрогеохимических поисков рудных месторождений/ Б. А. Колотов, С. Р. Крайнов, В. З. Рубейкин и др. М., Недра, 1983.

28. *Перельман А. И.* Геохимия. Высшая школа, 1979.

29. *Перельман А. И.* Геохимия ландшафта. М., Высшая школа, 1975.

30. *Поликарпочкин В. В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск. Наука, 1976.

31. *Проблемы* прикладной геохимии. Новосибирск, Наука, 1983.

32. *Ривес Р. Д., Брукс Р. Р.* Анализ геологических материалов на следы элементов. М., Недра, 1983.

33. *Сает Ю. Е.* Вторичные геохимические ореолы при поисках рудных месторождений. М., Наука, 1982.

34. *Сафронов Н. И.* К вопросу об «ореолах рассеяния» месторождений полезных ископаемых и их использовании при поисках и разведке. — Сб. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Ч. 1. 1981, с. 4—21.

35. *Сафронов Н. И.* К теории первичных ореолов рассеяния. — Инф. сб. ВИТР, 1959, № 21, с. 106—132.

36. *Сафронов Н. И.* Основы геохимических методов поисков рудных месторождений. Л., Недра, 1971.

37. *Сафронов Н. И., Мещеряков С. С., Иванов Н. П.* Энергия рудообразования и поиски полезных ископаемых. Л., Недра, 1978.

38. *Сауков А. А.* Геохимия. М., Наука, 1975.

39. *Смирнов В. И.* Геология полезных ископаемых. 4-е изд. М., Недра, 1982.

40. *Смирнов С. С.* Зона окисления сульфидных месторождений. 3-е изд. М., АН СССР, 1955.

41. *Соловов А. П.* Современное состояние и перспективы развития геохимических методов поисков рудных месторождений. Вестн. моск. ун-та, 1978, сер. IV, Геология, № 2, с. 3—28.

42. *Соловов А. П., Матвеев А. А., Ряховский В. М.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. Сб. задач. М., МГУ, 1978.

43. *Соловов А. П., Шваров Ю. В.* Оценка оруденения по литохимическим потокам рассеяния. — Разведка и охраиа недр, 1980, № 1, с. 25—30.

44. *Страхов Н. М.* Основы теории литогенеза. М., АН СССР, 1960, т. I, 1962, т. II, т. III.

45. *Фридман А. И.* Газовая съемка при поисках руд и геологическом картировании. М., ИМГРЭ, 1975.

46. *Фурсов В. З.* Газортутный метод поисков месторождений полезных ископаемых. М., Наука, 1983.

47. *Эммонс В.* Изменение первичного оруденения с глубиной. М.—Л., Геолразведиздат, 1933.

48. *Boom G. van den., Poppelbaum M.* Volatile Compaunds in Soil as Indicators in Geochemical Exploration for Concealed Ore Deposits.— Geol. Ib. D 58, 1982, p. 3—30.

49. *New atmogeochemical* methods in ore and fluorite exploration.Krčmár Břetislav, Adam Jiří, Jírovec Jiří, Přibil Rudolf.— Sb. geol. věd. Užitá geofyz., 1983, N 18, p. 191—205.

50. *Rose A. W., Hawkes H. E., Webb J. S.* Geochemistry in Mineral Exploration. London Acad. Press, 1979, 657 p.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Ниже приводятся главнейшие обозначения, принятые в настоящей работе и рекомендуемые к употреблению в литературе по геохимическим методам поисков и геологических отчетах.

A — местный параметр, определяющий смещение ореола рассеяния на склоне
A_x — коэффициент биогенного поглощения (захвата)
$2a$ — эффективная ширина геохимической аномалии в м
α — угол наклона местности к горизонту, угол
α' — склоновый коэффициент аллювия
B — коэффициент изменения объема пород при выветривании
$2b$ — эффективная длина геохимической аномалии, в м
β — угол падения рудного тела, множитель для оценки стандарта по размаху определений
$C_к$ — содержание химических элементов, отвечающее его кларку
$C_ф$ — фоновое содержание элемента
C_x — содержание элемента в точках по профилю
$\bar{C}_x$ — среднее арифметическое содержание
$\tilde{C}_x$ — среднее геометрическое содержание
C_{max} — максимальное содержание элемента в геохимической аномалии
$C_р$ — содержание элемента в полезном ископаемом
C_x' — содержание элемента в потоке рассеяния
$C_А$, $C_{А1}$ — нижнее аномальное содержание элемента
$C_{А,m}$ — содержание элемента, признаваемое аномальным при m коррелирующихся точках ($m \leqslant 9$)
d — плотность (объемная масса)
E — энергия рудообразования
ε — стандартный множитель ($\varepsilon = \text{antlg}\, S_{lg}$)
η — поправочный множитель для пересчета продуктивности надрудного первичного ореола на уровень промышленного оруденения
F — сила
f — число опробованных уровней (горизонтов) оруденения
$\Phi(x)$ — интеграл вероятностей для пределов $\pm x$
γ — показатель контрастности слабых геохимических аномалий — отношение полезного сигнала к уровню шума
H — глубина по вертикали (в м), на которую ведется подсчет прогнозных ресурсов
h — мощность элювио-делювиальных образований
h_0 — мощность чехла дальнеприносных отложений
I — мультипликативный показатель
Δh — ежегодный слой денудации
i, j — порядковые номера при буквенных обозначениях величины, номера точек наблюдения
K_x — коэффициент водной миграции элементов
$K_к$ — кларк концентрации
k — коэффициент остаточной продуктивности, характеризующий пропорциональность между количеством металла в ореоле и в коренном оруденении ($M : M_р$; $P : P_р$; $q : q_р$)
k' — коэффициент пропорциональности между продуктивностью ореолов и потоков рассеяния
$\varkappa$ — коэффициент подобия, характеризующий генетически однотипные месторождения
L — длина объекта (геохимической аномалии)
$2l$ — расстояние между профилями съемочной сети

$1/\lambda$ — миграционная способность (подвижность) элемента в первичном ореоле, в м
λ' — поправочный множитель для оценки истинной продуктивности литохимического потока рассеяния
M — надфоновое количество металла по профилю (линейная продуктивность аномалии), в м %
$M_р$ — количество металла в сечении рудной зоны. Линейная продуктивность полезного ископаемого, в м %
m, N, n — число точек, число проб, частость и т. п.
ν — геохимический показатель зональности — безразмерное отношение между содержаниями (количествами) двух или нескольких химических элементов геохимической аномалии, монотонно изменяющееся по заданному направлению
ω — угол
P — надфоновая площадная продуктивность геохимической аномалии, в м² %
$P_р$ — площадная продуктивность коренного оруденения, в м² %
P_i — полная (устойчивая) продуктивность потока рассеяния, в м² %
P'_x — кажущаяся продуктивность потока рассеяния
$2p$, $2p_x$ — мощность рудного тела, в м
$2p_y$ — длина рудного тела, в м
Π — вероятность случайного события
Q — количество (запасы) металла, в т
$Q_н$ — прогнозные (геологические) ресурсы металла в рудопроявлениях до глубины H
q — количество металла в ореоле рассеяния для слоя 1 м, в т
$q_р$ — количество металла в коренном оруденении для слоя 1 м, в т
$\Delta q_р$ — удельная продуктивность оруденения, в т/м/км²
R — расстояние от вершины водораздела до точки P'_{max}, размах наблюдений
R_0 — расстояние от вершины водораздела до точки начала поступления металла из ореола в русло
r — коэффициент корреляции; радиус
S_x — площадь водосбора (бассейна денудации), в м²
S_α — смещение ореола рассеяния к подножью склона, в м
S_β — смещение ореола рассеяния по восстанию, в м
s — стандартное отклонение
σ — коэффициент гипергенного рассеяния, в м
T — время
τ_x — коэффициент талассофильности
x — направление по профилю (вкрест простиранию рудного тела), направление вдоль русла по направлению стока
Δx — шаг опробования по профилю, в м
y — направление по простиранию рудного тела
z — направление по падению рудного тела, по нормали к дневной поверхности, глубина, в м

Индексы x, y, z, 0, h, p, i и др. при буквенных обозначениях указывают, что данная переменная величина или параметр рассматриваются вдоль соответствующего направления (x, y или z), на дневной поверхности (0), на границе коренных пород (h), в рудной зоне (р), в точке с номером i и т. п.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аккумуляция 51, 83, 96
Аномалия
безрудная 249
биогеохимическая 44
геохимическая 11, 43
гидроморфная 142
гидрохимическая 43
гипергенная 16, 249
зоометрическая 45
литохимическая 13
рудная 249
слабая 13
техногенная 249
явная 12
Анализ
активационный 270
атомно-абсорбционный 269
рентгенорадиометрический 270
спектральный 268
химико-абсорбционный 269
хроматографический 227
частично-фазовый 143
ядерно-физический 270

Баланс влаги 59
Барьер
биологический 231
восстановительный 52
геохимический 51
гравитационный 52
испарительный 52
кислородный 52
щелочной 52
Биосфера 6

Вектор зональности 174
Вероятность обнаружения 36
«Встречаемость» элементов 31
Вытяжки кислотные 142
Вязкость 109

Геохимический спектр объекта 261
Гидросфера 6
Горизонт представительный 93

Десятичная классификация месторождений 35
Дефлюкция 135
Дешифрирование аэрофотоснимков 249
Дискретный ряд цифр 269
Дифференциация расплава 165

Журнал полевой 268

Задача Бюффона 37
Закон
Вернадского 7
распределения 20
Закрепление солевого ореола 106
Запасы геохимические 10
Зона окисления 102
Зональность оруденения 161
вертикальная 174
обратная 195
центриклинальная 195

Изотермы рудоотложения 195
Интеграл вероятностей 22
Интерферометр шахтный 226
Испаряемость 106

Категории ресурсов 57
Кларки 6
Кларк концентрации 9
Климат
аридный 106
гумидный 106
Контрастность слабой аномалии 26
Кора выветривания 86
Корреляция между содержаниями элементов 173
Коэффициент
биологического поглощения 229
водной миграции 49
геохимического подобия 177
гипергенного рассеяния 114
остаточной продуктивности 92, 123, 129
продуктивности 34, 53
склоновый 70
талассофильности 49
Круговая палетка Дубова 151
Крупные месторождения 35, 42
Курумы 267

Ландшафты
автономные 46
супераквальные 46
трансэлювиальные 46
элювиальные 46
элементарные 46
Линейка Дубова 151
Литосфера 6

Макроэлементы 21
Масштаб съемок 19, 53
Месторождения
погребенные 40
слепые 40
эталонные 179, 197
Метод
поисков зоометрический 45
размерностей 109, 119
трех уровней 121
Миграция элементов 7
Микроэлементы 23
Минералы
тяжелые 83, 124
устойчивые 83, 124
Модель
первичных ореолов 164
эндогенного оруденения 189
Модули стока 59
Морена донная 84
Мультипликация 144

Ореол
надрудный 14, 164, 167
подрудный 14, 164, 167
экзогенный 155
эндогенный 155
Ореол рассеяния
аккумулятивный 96
вторичный 15
выщелоченный 97
газовый 16
гипергенный 249
диффузионный 95
закрытый 92
надрудный 96
наложенный 92
остаточный 92
открытый 92
оторванный 96
погребенный 98
предельно-разубоженный 96
частично-погребенный 249
Оценка эрозионного среза 196

Палетки Дубова 153
Парадокс крутых склонов 135
Погрешность анализа 269
Подвижность частиц взаимная 99
Подвижность элементов
гипергенная 100
диффузионная 171
инфильтрационная 171
Показатель геохимической зональности 173
Показатель
контрастности 26
непараметрический 31
параметрический 31
случайно монотонный 188
Поле рассеяния 15
Почвы щебенистые 260
Принцип
суперпозиции 35
эквивалентности 115
подобия
в геохимии 37
в механике 109
Продуктивность аномалии
линейная 32
площадная 32
Продуктивность потока рассеяния
истинная 70
кажущаяся 70
Произведение растворимости 105, 209

Размеры аномалий
«истинные» 119
выявленные 26
Районирование территорий 238
Распределение
логнормальное 21
нормальное 20
пространственно упорядоченное 30, 114
«случайное» 31
Растворимость минералов 105
Растения-концентраторы 230
Ресурсы прогнозные 55
Рудоносность
потенциальная 20
реальная 20
Руды забалансовые 14
Ряды зонального отложения 162

Сглаживание данных 143
Склон вогнутый 145, 148
Слой денудации 59
Содержание металла бортовое 13
Среднее скользящее 143
Срез эрозионный 196
Стадии
выветривания 86
геологоразведочного процесса 53, 56
Стандартный множитель 24
Стандартное отклонение 21
Съемка
автомобильная 18
атмохимическая (газовая) 17
аэрогаммаспектральная 19
аэрогеохимическая 19
биогеохимическая 17
гелиевая 218
гидрохимическая 17
литохимическая 17
глубинная 18
наземная 18
шлиховая 61

Теорема Ляпунова 20, 120
Триады Страхова 166

Углеводородные газы 218
Углеводороды тяжелые 219
Усиление слабых аномалий 144

Фон геохимический 13
Формула Шурыгина 38
Функция рассеяния 113

«Центры тяжести» графиков 180
Цикл геологической миграции элементов 7

Число показателей зональности 182
Число Рейнольдса 132

Шаг съемки 19
Шлейф ореола 148

Экспозиция склона 260
Экспресс-анализ 23
Электроды ионо-селективные 271
Элементы
активные водные мигранты 49
с контрастной миграционной способностью 49
халькофильные 220
Элювий 88
Элювио-делювий 89
Энергия рудообразования 178
Эффективность поисков 57

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . 3

Глава 1. Общие принципы геохимических поисков . . . 4

1.1. Введение . . . 4
1.2. Основные положения геохимии . . . 5
1.3. Геохимическое поле и его локальные аномалии . . . 10
1.4. Геохимические съемки . . . 17
1.5. Параметры геохимического поля . . . 20
1.6. Объекты поисков . . . 35
1.7. Взаимосвязанность геохимических аномалий в геосферах . . . 43
1.8. Геохимические ландшафты . . . 46
1.9. Методика поисков и оценка их эффективности . . . 53

Глава 2. Литохимические потоки рассеяния . . . 58

2.1. Твердый и растворимый сток с суши . . . 58
2.2. Уравнения идеального потока рассеяния . . . 62
2.3. Формирование реальных потоков рассеяния . . . 69
2.4. Методика поисковых съемок . . . 77

Глава 3. Вторичные литохимические ореолы рассеяния рудных месторождений . . . 85

3.1. Выветривание и денудация . . . 85
3.2. Классификация вторичных ореолов рассеяния . . . 90
3.3. Механический ореол рассеяния . . . 99
3.4. Солевой ореол рассеяния . . . 101
3.5. Уравнение остаточного рассеяния . . . 108
3.6. Параметры вторичного ореола рассеяния . . . 119
3.7. Смещения и деформации ореолов . . . 130
3.8. Наложенные ореолы рассеяния . . . 139
3.9. Взаимоотношения ореолов и потоков рассеяния . . . 145
3.10. Решение прямых и обратных задач . . . 149

Глава 4. Первичные ореолы рудных месторождений . . . 155

4.1. Рудное тело и его первичный ореол . . . 155
4.2. Параметры первичного ореола . . . 168
4.3. Исследование зональности месторождений . . . 179
4.4. Решение поисково-оценочных задач . . . 196

Глава 5. Гидрохимический, атмохимический и биогеохимический методы поисков . . . 206

5.1. Гидрохимический метод . . . 206
5.2. Атмохимический метод . . . 217
5.3. Биогеохимический метод . . . 228

Глава 6. Практика геохимических поисков . . . 236

6.1. Общие принципы . . . 236
6.2. Поиски твердых полезных ископаемых . . . 238
6.2.1. Поисковые съемки . . . 242

6.2.2. Детальные и оценочные работы 257
6.2.3. Отбор, обработка и анализ проб 266
6.2.4. Оценки прогнозных ресурсов 272
6.3. Поиски месторождений нефти и газа 276

Заключение 283
Список литературы 286
Перечень обозначений 288
Предметный указатель 290

Александр Петрович Соловов

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Редакторы издательства
Л. А. Дубкова,
А. М. Антокольская
Технический редактор
О. А. Колотвина
Корректор
С. В. Зимина

ИБ № 6176

Сдано в набор 18.02.85. Подписано в печать 07.06.85. Т-10973. Формат 60×90[1]/[16]. Бумага кн.-журн. имп. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 18,5. Усл. кр.-отт. 18,5. Уч.-изд. л. 19,86. Тираж 6100 экз. Заказ 405/370 — 2. Цена 1 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.